

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA: INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:  
ANÁLISIS DE CALIDADES SUPERFICIALES DEL DURALUMINIO EN EL  
FRESADO PLANO MEDIANTE LA VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE  
MECANIZADO, USANDO UNA FRESADORA CNC ASISTIDA POR UN  
SISTEMA CAD-CAM**

**AUTORES:  
CHRISTIAN ANDRÉS AGUIRRE MALUSÍN  
MARCO ENRIQUE CUÑAS CHINCHERO**

**TUTOR:  
JOSÉ OLGER PÉREZ SILVA**

**Quito, agosto del 2016**

### **Cesión de derechos de autor**

Nosotros, Christian Andrés Aguirre Malusín con documento de identificación N° 172480603-7 y Marco Enrique Cuñas Chinchero con documento de identificación N° 172048869-9, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “Análisis de calidades superficiales del duraluminio en el fresado plano mediante la variación de parámetros de mecanizado, usando una fresadora CNC asistida por un sistema CAD-CAM”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Christian Andrés Aguirre Malusín  
Cédula: 172480603-7  
Fecha: Quito, Agosto del 2016



Marco Enrique Cuñas Chinchero  
Cédula: 172048869-9

### **Declaratoria de coautoría del docente tutor/a**

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “Análisis de calidades superficiales del duraluminio en el fresado plano mediante la variación de parámetros de mecanizado, usando una fresadora CNC asistida por un sistema CAD-CAM”, realizado por Christian Andrés Aguirre Malusín y Marco Enrique Cuñas Chinchero, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Agosto del 2016



José Olger Pérez Silva

Cédula de identidad: 170982275-1

## **Dedicatoria**

Humildemente dedico este trabajo a mi padre Julio Aguirre cuyo sacrificio constante y apoyo incondicional en todas las metas que me he propuesto, cuyas enseñanzas de constancia, responsabilidad y honestidad han marcado mi vida de éxitos, a mi madre por su infinito cariño y comprensión ante las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida.

A mi hija Madelaine que ha sido el motor para seguir adelante y nunca desistir por mis sueños y cuyo amor me ha enseñado que todas las cosas maravillosas llegan a su tiempo. Finalmente al único ser maravilloso, Jesucristo, por darme la oportunidad de vivir y sentir el calor de una familia y amigos que siempre estarán ahí para apoyarme.

Andrés

Un gran reconocimiento a un ser maravilloso que impulsó cada segundo de mi vida, a mi padre Florentino quien incondicionalmente me brindo su mano de apoyo, confianza, sus sabios conocimientos en valores y respeto, ante todo un gran ejemplo de ser profesional, a mi madre Martha que con su amor, paciencia y consentimientos me ha formado como una persona honesta, humilde y sencilla siendo mi gran amiga en los buenos y malos momentos, a mis hermanos Danilo y Anthony, que con grandes vivencias siempre han influido positivamente en cada decisión.

A mi Dios y María Auxiliadora que han formado mi camino lleno de sabiduría y de bendiciones.

Marco

## **Agradecimiento**

Los más sinceros agradecimientos al Ing. Olger Pérez, por extender su confianza y apoyo a este grupo de trabajo, por su acertada tutoría y guía en todo el proceso de elaboración y culminación de este proyecto de titulación.

A todos aquellos docentes de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana, que con sus enseñanzas, anécdotas y experiencias fueron un pilar importante en el crecimiento profesional y personal de nosotros como estudiantes.

## Índice

Introducción .....	1
Objetivos .....	2
General.....	2
Específicos .....	2
Capítulo 1 .....	3
1    Marco teórico.....	3
1.1    Aluminio .....	3
1.2    Definición.....	3
1.3    Obtención.....	3
1.4    Propiedades .....	5
1.4.1    Propiedades físicas .....	6
1.4.2    Propiedades mecánicas.....	6
1.5    Clasificación.....	7
1.5.1    Aleaciones para colar .....	7
1.5.2    Aleaciones forjadas .....	7
1.6    Composición y aplicaciones del Aluminio .....	10
1.7    Duraluminio .....	11
1.7.1    Serie 7xxx.....	11
1.7.2    Prodax.....	11
1.8    Procesos de manufactura.....	14
1.9    El Control Numérico .....	16
1.10    Factores de mecanizado.....	16
1.10.1    Velocidad de corte.....	17
1.10.2    Avance de la herramienta .....	17
1.10.3    Profundidad de mecanizado .....	17

1.11	Controlador CNC.....	17
1.11.1	Definición. ....	17
1.11.2	Tipos de controladores. ....	18
1.11.3	Codificación G y M en el controlador FANUC .....	18
1.11.4	FANUC serie OI-MD.....	18
1.12	Centro de mecanizado Leadwell v20i. ....	19
1.13	Sistemas CAD/CAM .....	20
1.13.1	Definición de sistema CAD/ CAM. ....	20
1.13.2	InventorCAM. ....	20
Capítulo 2	.....	22
2	Desarrollo experimental .....	22
2.1	Selección de parámetros de corte para el mecanizado .....	23
2.2	Variación de parámetros de corte para el mecanizado de desbaste .....	26
2.3	Variación de parámetros de corte para el mecanizado de acabado.....	28
2.4	Programación en InventorCAM Demo .....	30
2.5	Medición de rugosidad en la superficie .....	37
2.5.1	Tablas de rugosidad obtenidas tras el mecanizado con parámetros definidos y variables en el proceso de desbaste.....	39
2.5.2	Tablas de rugosidad obtenidas tras el mecanizado con parámetros definidos y variables en el proceso de acabado. ....	52
Capítulo 3	.....	62
3	Análisis de resultados .....	62
3.1	Análisis de desbaste con profundidad de 2 mm .....	62
3.2	Análisis de desbaste con profundidad de 4 mm .....	64
3.3	Análisis de acabado con profundidad de 1 mm .....	66

3.4	Análisis de acabado con profundidad de 0.2 mm. ....	68
3.5	Comparación de resultados en el mecanizado .....	70
3.6	Resultado general del análisis .....	71
3.7	Discusión de resultados.....	73
3.8	Discusión de resultados en tiempos de mecanizado. ....	74
Conclusiones .....		76
Recomendaciones.....		78
Referencias.....		79



## Índice de tablas

Tabla 1. Aluminio y sus aleaciones.....	8
Tabla 2. Notaciones básicas del templado .....	8
Tabla 3. Subdivisiones endurecidas por deformación.....	9
Tabla 4. Subdivisiones de tratamiento térmico .....	9
Tabla 5. Composición y Aplicaciones del Aluminio .....	10
Tabla 6. Características del PRODAX .....	12
Tabla 7. Áreas de aplicación .....	13
Tabla 8. Fresado frontal .....	13
Tabla 9. Fresado de acabado .....	14
Tabla 10. Procesos de Manufactura .....	15
Tabla 11. Parámetros de corte del material Prodax.....	24
Tabla 12. Parámetros de velocidad de corte para desbaste. ....	25
Tabla 13. Nuevos parámetros de velocidad de corte para desbaste. ....	26
Tabla 14. Ensayo N° 1 Variación de Velocidad de corte, avance por diente, profundidad .....	27
Tabla 15. Ensayo N° 2 Variación de velocidad de corte, avance por diente, profundidad .....	28
Tabla 16. Ensayo N° 3 Variación de velocidad de corte, avance por diente, profundidad .....	29
Tabla 17. Ensayo N° 4 Variación de velocidad de corte, avance por diente, profundidad .....	29
Tabla 18. Medición de rugosidad de desbaste (profundidad 2 mm- fz 0.1).....	40
Tabla 19. Medición de rugosidad de desbaste (profundidad 2 mm- fz 0.2).....	41
Tabla 20. Medición de rugosidad de desbaste (profundidad 2 mm- fz 0.3).....	43

Tabla 21. Medición de rugosidad de desbaste (profundidad 2 mm- fz 0.4).....	44
Tabla 22. Medición de rugosidad de desbaste (profundidad 4 mm- fz 0.1).....	46
Tabla 23. Medición de rugosidad de desbaste (profundidad 4 mm – fz 0.2).....	47
Tabla 24. Medición de rugosidad de desbaste (profundidad 4 mm – fz 0.3).....	49
Tabla 25. Medición de rugosidad de desbaste (profundidad 4 mm – fz 0.4).....	50
Tabla 26. Medición de rugosidad de acabado (profundidad 1 mm – fz 0.05) .....	52
Tabla 27. Medición de rugosidad de acabado (profundidad 1 mm – fz 0.2) .....	54
Tabla 28. Medición de rugosidad de acabado (profundidad 1 mm – fz 0.35) .....	55
Tabla 29. Medición de rugosidades de acabado (profundidad 0.2 mm – fz 0.05) .....	57
Tabla 30. Medición de rugosidades de acabado (profundidad 0.2 mm – fz 0.2) .....	58
Tabla 31. Medición de rugosidades de acabado (profundidad 0.2 mm – fz 0.35) .....	60
Tabla 32. Resultados de rugosidad en probetas de desbaste a 2 mm.....	62
Tabla 33. Parámetros de mecanizado de desbaste (2 mm) aluminio Prodax. ....	63
Tabla 34. Resultados de rugosidad en probetas de desbaste a 4 mm .....	64
Tabla 35. Parámetros de mecanizado de desbaste (4 mm) aluminio Prodax .....	65
Tabla 36. Resultados de rugosidad en probetas de acabado a 1 mm .....	66
Tabla 37. Parámetros de mecanizado de acabado (1 mm) aluminio Prodax.....	67
Tabla 38. Resultados de rugosidad en probetas de acabado a 0.2 mm .....	68
Tabla 39. Parámetros de mecanizado de acabado (0.2 mm) aluminio Prodax.....	70
Tabla 40. Verificación de resultados .....	72
Tabla 41. Parámetros óptimos de mecanizado ASSAB PRODAX AA-7075 .....	72

## Índice de figuras

Figura 1. Primera fase de obtención.....	4
Figura 2. Segunda fase de obtención.....	5
Figura 3. Sistema de comunicación FANUC- CONTROLADORES-CNC.....	19
Figura 4. Simulación de mecanizado en InventorCAM.....	21
Figura 5. Diagrama de proceso .....	23
Figura 6. Diseño de la Probeta .....	30
Figura 7. Selección del cero pieza.....	31
Figura 8. Selección del material Alumium 150BHN-81HRB.....	31
Figura 9. Selección de la operación de fresado .....	32
Figura 10. Definición de la herramienta de corte .....	32
Figura 11. Parámetros de corte de la herramienta .....	33
Figura 12. Selección del material de la herramienta HSS (Acero rápido) .....	33
Figura 13. Selección del cono porta-herramienta serie BT-40 ER 32X60.....	34
Figura 14. Profundidad de fresado .....	34
Figura 15. Selección de estrategia de mecanizado .....	35
Figura 16. Selección de ángulo de desplazamiento.....	35
Figura 17. Aproximación y retirada de la herramienta de corte.....	36
Figura 18. Listado de la variación de parámetros en la herramienta.....	36
Figura 19. Códigos G en CIMCO Edit v.5.6 Demo .....	37
Figura 20. Crestas de rugosidad .....	38
Figura 21. Gráfica de rugosidad del ensayo N° 1, fz=0.1 .....	41
Figura 22. Gráfica de rugosidad del ensayo N° 1, fz=0.2 .....	42
Figura 23. Gráfica de rugosidad del ensayo N° 1, fz=0.3 .....	44
Figura 24. Gráfica de rugosidad del ensayo N° 1, fz=0.4 .....	45
Figura 25. Gráfica de rugosidad del ensayo N° 2, fz=0.1 .....	47

Figura 26. Gráfica de rugosidad del ensayo N° 2, $f_z=0.2$ .....	48
Figura 27. Gráfica de rugosidad del ensayo N° 2, $f_z=0.3$ .....	50
Figura 28. Gráfica de rugosidad del ensayo N° 2, $f_z=0.4$ .....	51
Figura 29. Gráfica de rugosidad del ensayo N° 3, $f_z=0.05$ .....	53
Figura 30. Gráfica de rugosidad del ensayo N° 3, $f_z=0.2$ .....	55
Figura 31. Gráfica de rugosidad del ensayo N° 3, $f_z=0.35$ .....	56
Figura 32. Gráfica de rugosidad del ensayo N° 3, $f_z=0.05$ .....	58
Figura 33. Gráfica de rugosidad del ensayo N° 3, $f_z=0.2$ .....	59
Figura 34. Gráfica de rugosidad del ensayo N° 3, $f_z=0.35$ .....	61
Figura 35. Gráfica de rugosidad en función de $f_z$ y $V_c$ - resultado de desbaste a 2 mm .....	62
Figura 36. Gráfica de resultados de desbaste a 2 mm en planos bidimensionales ....	63
Figura 37. Gráfica de rugosidad en función de $f_z$ y $V_c$ - resultado de desbaste a 4 mm .....	64
Figura 38. Gráfica de resultados de desbaste a 4 mm en planos bidimensionales ....	65
Figura 39. Gráfica de rugosidad en función de $f_z$ y $V_c$ - resultado de acabado a 1 mm .....	66
Figura 40. Gráfica de resultados de desbaste a 1 mm en planos bidimensionales ....	67
Figura 41. Gráfica de rugosidad en función $f_z$ y $V_c$ - resultado de acabado a 0.2 mm	69
Figura 42. Gráfica de resultado de acabado a 0.2 mm en planos bidimensionales ....	69
Figura 43. Comparación de resultados en el procesos de desbaste .....	71
Figura 44. Comparación de resultados en el procesos de acabado .....	71

## **Índice de anexos**

Anexo 1 Códigos “G” .....	82
Anexo 2 Códigos “M” .....	84
Anexo 3 Especificaciones técnicas del Centro de Mecanizado Leadwell v20i. ....	85
Anexo 4 Catálogo ASSAB PRODAX .....	86
Anexo 5 Códigos de programación.....	88

## **Resumen**

El presente proyecto tiene la finalidad de mostrar un análisis de calidades superficiales del duraluminio Prodax A7075 usando una fresadora CNC asistida por un sistema CAD-CAM a través del mecanizado plano, realizando la variación de parámetros (avance de la herramienta, velocidad de corte, profundidad de pasada), partiendo de los establecidos previamente en los catálogos, con una fresa HSS de 20 mm de diámetro con 4 filos de corte.

La investigación se desglosa en 3 capítulos, el primer capítulo abarca la parte teórica, partiendo desde el origen del material sin ser aleado, hasta conocer las aleaciones, sus características y aplicaciones, de esta manera elegir el material que comercialmente se utiliza en el sector industrial del Ecuador, de igual manera se enfoca en el controlador CNC y el sistema CAD-CAM utilizado.

El segundo capítulo corresponde al desarrollo experimental, el cual se realizó mediante el mecanizado de 32 probetas para desbaste y 24 para acabado, con una selección adecuada de los parámetros respecto a las características del centro de mecanizado y de la herramienta de corte, posterior a esto se realiza la medición de rugosidades con la ayuda de un rugosímetro Mitutoyo SJ210 y la visualización en el microscopio, la elaboración de registros, gráficos ayudan fundamentalmente para sintetizar estos datos obtenidos.

Finalmente en el tercer capítulo se desarrolla el análisis de rugosidad media (Ra) de las probetas que presentan mejores características superficiales con el fin de establecer estos valores como el resultado más apropiado para el mecanizado del Prodax.

*Palabras clave:* análisis de calidades superficiales, calidades superficiales, duraluminio, aluminio Prodax, rugosidad media.

## **Abstract**

This project is aiming to show an analysis about shallow quality of the duralumin Prodax A7075 using a milling machine CNC assisted by a system CAD-CAM through the machining plane, performing variation of parameters (tool feed, cutting speed, depth of cut), based on the parameters set in the catalogs, with a milling cutter HSS 20 mm diameter with 4 cutting edges.

The research is divided into 3 chapters, the first covers the theoretical part, starting from the origin of the material without being alloy, to know their alloys, characteristics and applications, thus chose the material that commercially is used in the industrial sector of Equator, similarly it focuses in the controller CNC and the system CAD-CAM used.

The second chapter corresponds to experimental development, which was performed by 32 specimens machining for roughing and 24 for finishing, with a right selection of the parameters regarding the characteristics of the machining center and the cutting tool, after this the roughness measurement is performed, with the aid of a Mitutoyo roughness SJ210 and the visualization in the microscope, the preparation of graphic records, primarily help for synthesize this data.

Finally in the third chapter the analysis of the average roughness (Ra) of the test tube that represents the best surface characteristics is developed, with the purpose of establish this values as the best result for the Prodax mechanizing.

*Keywords:* analysis of surface quality, surface qualities, duralumin, aluminum Prodax, roughness average.

## **Introducción**

Uno de los paradigmas del mecanizado es lograr maximizar la tasa de arranque del material, minimizando al mismo tiempo el desgaste de la herramienta y manteniendo la calidad superficial de todas las piezas.

Al considerar el duraluminio como materia prima base para este estudio, se debe considerar que este material, posee alta resistencia y buena estabilidad, lo cual se consigue a través de operaciones especiales como estiramiento en frío y alivio de tensiones a 164-168 Brinell. La razón más congruente para la selección de este material es su excelente mecanizado a altas velocidades de corte, tiempos de producción y disminución de costo herramental.

En el mercado nacional el material más relevante con características antes mencionadas es el aluminio PRODAX A7075, el mismo que se ha considerado utilizar para el análisis del mecanizado plano como la alternativa más influyente para la recopilación y comparación de resultados, que contribuyan a la perfecta selección de nuevos parámetros en relación a los datos propuestos en textos informativos, con la obtención de datos experimentales se reducirá el tiempo de selección de velocidades de corte y avances de la herramienta de trabajo. Estos a su vez serán de beneficio en la disminución de los tiempos de producción y así aumentar la eficiencia de los procesos constructivos.



## **Objetivos**

### **General**

Analizar las calidades superficiales que presenta el duraluminio a través del fresado plano mediante la variación de parámetros de mecanizado, usando una fresadora CNC asistida por un sistema CAD-CAM.

### **Específicos**

- Conocer las características del duraluminio y la utilización del mismo en el sector metalmecánico.
- Aplicar los conocimientos teóricos y prácticos para realizar los cálculos del mecanizado plano.
- Mecanizar las probetas de acuerdo a un método seleccionado en un sistema CAD-CAM, con una fresa de HSS de 20 mm de diámetro.
- Identificar las calidades superficiales y acabados a diferentes cambios de variables como velocidades y avances de la herramienta de corte.
- Verificar las distintas particularidades en las superficies de las probetas mediante la utilización de un rugosímetro.

## **Capítulo 1**

### **1 Marco teórico**

#### **1.1 Aluminio**

De los metales estructurales comúnmente utilizados como: hierro (Fe), cobre (Cu) y el aluminio (Al), éste último es el más abundante en la corteza terrestre con un valor aproximado del 7.5% (Neely, 2002, pág. 35).

#### **1.2 Definición**

Es un metal que ha tomado vital importancia en la industria debido a su fabricación, oscilando valores relativamente altos de pureza desde el 99,5 % hasta un 99,9%. Sin embargo la utilización del aluminio no es en su totalidad de manera pura, la formación de aleaciones logran modificar las propiedades físicas, demostrando mejoras en comparación al aluminio puro.

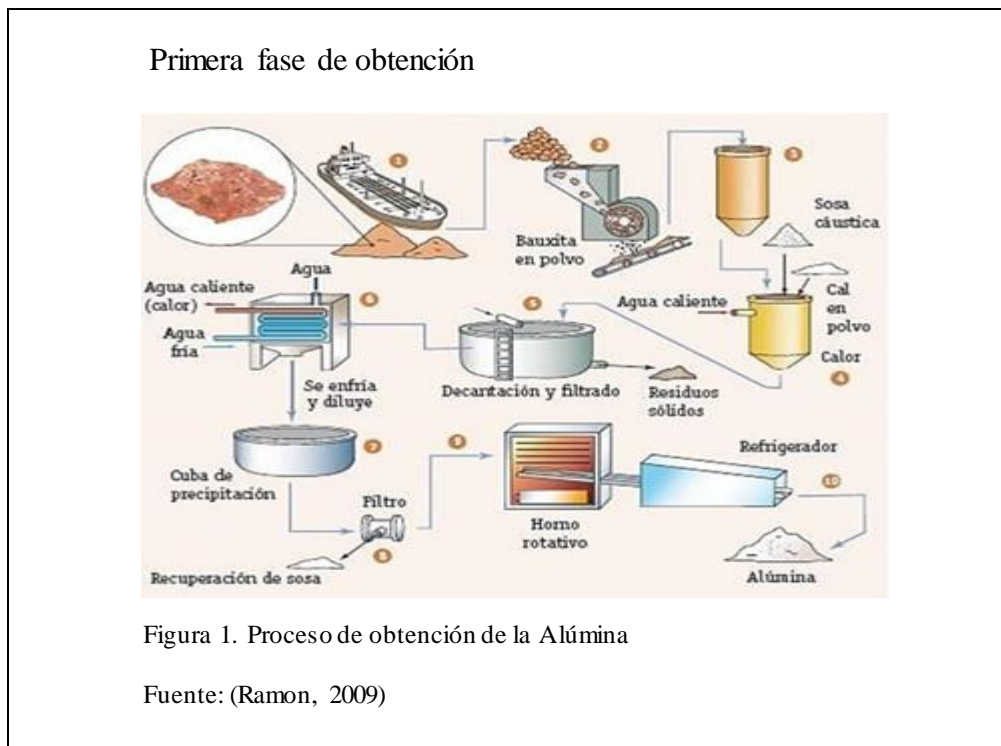
Charles Hall y Paul L.T. Héroult fueron quienes implementaron sistemas de producción en sus países de origen, Estados Unidos y Francia respectivamente, sus descubridores fueron dos singulares personas con años de similitud en nacimiento, descubrimiento y muerte.

#### **1.3 Obtención**

La extracción de este metal de la naturaleza y separación de los minerales con los cuales está asociado no se llevó acabo hasta 1886 en que un joven americano llamado Hall y el francés Héroult descubrieron simultáneamente la manera de obtener el aluminio (Johnson & Weeks, 1961, pág. 55).

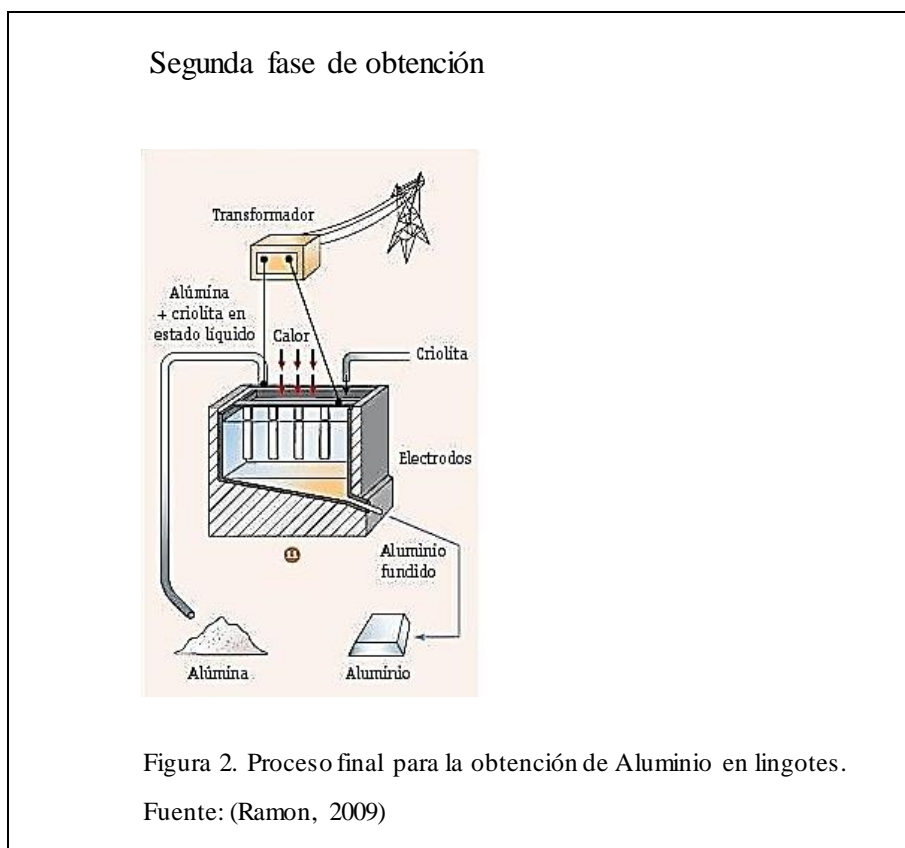
El mineral empleado para la producción del aluminio se denomina bauxita, la cual es sometida a dos procesos de refinación, los mismos que se detallan a continuación:

De acuerdo con Neely (2002,pag.38), el primero es la trituración y pulverización de la bauxita, tal como se observa en la figura 1, que consiste en desintegrar el mineral en distintos componentes tales como silicio, hierro, óxido de titanio, agua y óxido de aluminio, mediante la mezcla con sosa cáustica (hidróxido de sodio, NaOH), la cual al mismo tiempo ayuda a que el óxido de aluminio se disuelva separando las impurezas. Posteriormente se almacena en grandes depósitos, a fin de enfriarlo paulatinamente obteniendo que el hidróxido de aluminio repose en el fondo, para ser lavado, eliminando los residuos de sosa caustica. Mediante la utilización de hornos rotativos el hidróxido de aluminio se calienta separando el agua en forma de vapor y obteniendo como residuo un polvo blanco (óxido de aluminio) denominado alúmina.



El segundo proceso consiste en la formación de aluminio metálico partiendo de la alúmina, la cual es sometida a refinación por reducción electrolítica en cubas llenas de criolita, las mismas que son fundidas por medio de corriente eléctrica, para producir la disolución de la alúmina en polvo mediante el baño de la criolita. “Por medio del proceso de electrolisis, la alúmina se descompone en aluminio metálico y oxígeno. El oxígeno se expulsa como un gas y queda el aluminio metálico” (Neely, 2002, pág. 38).

Debido a la densidad que presenta el aluminio es sustraído desde el fondo del baño y finalmente colocado en lingoteras. Ver figura 2.



## 1.4 Propiedades

La combinación de propiedades que presenta el aluminio incrementa la utilidad como material de ingeniería, al ser blando y dúctil, además se caracteriza al ser

resistente a la corrosión debido al óxido tenaz presente en la superficie. “Su buena conductividad eléctrica es una de sus propiedades más valiosas, siendo 60% de la del cobre y 3.5% de la del hierro” (Johnson & Weeks, 1961, pág. 153).

#### 1.4.1 Propiedades físicas

- **Densidad:** Presenta una densidad baja de 2.70 gr/cm<sup>3</sup>, en comparación con 7.8 gr/cm<sup>3</sup> del acero y posee una densidad relativa de 2.25 a 2.77 con respecto al agua.
- **Color:** Normalmente suele ser de color blanco, blanco con tono grisáceo, con alta reflectividad, es decir, de tono brillante o altamente pulido.
- **Conductividad térmica:** El aluminio está situada entre 80 y 230W/m\*K, siendo esta hasta 4 veces mayor al acero.
- **Punto de fusión:** Este tipo de material se caracteriza por tener un punto de fusión de 660°C, actualmente es utilizado en varios campos de la industria química, metalúrgica y térmica.
- **Resistencia a la corrosión:** Una de las ventajas más favorables del aluminio es la formación de películas de óxido de aluminio el cual sirve como protector de los efectos del agua, mar y medio ambiente.

#### 1.4.2 Propiedades mecánicas

- **Dureza:** Es la resistencia de un material ante la penetración, se lo puede medir en HB Brinell y HRC Rockwell, en el aluminio puro la dureza se mantiene en HB-15 y se prolonga hasta HB-110 en el aluminio tratado térmicamente AA7075 (PRODAX).
- **Resistencia a la tracción:** Es la máxima tensión que puede soportar una estructura, en estado cristalino de 630 kg/cm<sup>2</sup> y de 1680 kg/cm<sup>2</sup> en estado de endurecimiento.

## **1.5 Clasificación**

El sistema numérico más utilizado entre los fabricantes fue adoptado por la Aluminium Association en 1954, las distintas aleaciones se han enmarcado según dos distintos tipos de representaciones según normas internacionales como la ASTM (American Society for Testing & Materials) o por otro lado la SAE (Society of Automotive Engineers), donde el primer dígito corresponde al tipo de aleación, el segundo indica el tipo de modificación realizado sobre la aleación original y los dos últimos dígitos se relacionan a la aleación específica o si presenta impurezas el aluminio (Neely, 2002, pág. 68).

Por su composición las aleaciones de aluminio se clasifican en: aleaciones para colar y aleaciones forjadas.

### **1.5.1 Aleaciones para colar**

Los elementos aleados con el aluminio en el colado son utilizados para favorecer las propiedades en las piezas resultantes, de manera que aumenta la resistencia mecánica y su dureza. Las aleaciones para colar de mayor importancia son las de aluminio-cobre y aluminio-silicio.

### **1.5.2 Aleaciones forjadas**

Estas aleaciones se caracterizan al poseer mejores propiedades físicas debido a los efectos beneficiosos producidos por el tratamiento mecánico, laminado, extrusión y forja, los cuales afinan la estructura del grano como también la homogenización en las aleaciones (Johnson & Weeks, 1961, pág. 159).

En la tabla 1 se observa la designación de acuerdo al elemento principal con el cual esta aleado.

Tabla 1.  
Aluminio y sus aleaciones

<i>Número clave</i>	<i>Elemento de aleación principal</i>
1xxx	Ninguno
2xxx	Cobre
3xxx	Manganeso
4xxx	Silicio
5xxx	Magnesio
6xxx	Magnesio y Silicio
7xxx	Cinc
8xxx	Otros elementos
9xxx	No utilizado (no está asignado aun)

Nota: El número clave muestra cada tipo de elemento que puede ser aleado con el aluminio.

Fuente: (Neely, 2002, pág. 68)

### Notación del templado

Las aleaciones templadas de aluminio forjado se designan después de la serie de cuatro dígitos, mediante un guión de separación, seguido de una letra y varios dígitos respectivamente, por ejemplo: 7075-T6, la lectura adecuada para el templado se basa en las *tablas 2, 3 y 4*, de las cuales se obtiene el significado y descripción de cada término o letra.

Tabla 2.  
Notaciones básicas del templado.

<b>Letra</b>	<b>Significado</b>	<b>Descripción</b>
F	En estado tosco de fabricación.	Sin control sobre la cantidad del endurecimiento
O	Recocido y cristalizado.	Templado con baja Resistencia y alta ductilidad
H	Endurecido por tensión	Incremento de resistencia mecánica debido al endurecimiento por trabajo. Véase tabla 3.
T	Tratado térmicamente para producir temples	Véase tabla 4.

Nota: Cada letra representa el estado en el que se encuentra las aleaciones templadas de aluminio forjado y cada característica que tendría el material en ese estado.

Fuente: (Smith & Hashemi, 2006, pág. 298)

Tabla 3.  
Subdivisiones endurecidas por deformación.

Subdivisión	Descripción
H 1	Endurecido únicamente por deformación
H 2	Endurecido por deformación y parcialmente recocido
H 3	Endurecido por deformación y estabilizado

Nota: Estos tipos de subdivisión indican la formación de endurecimiento existen en cada aleación de aluminio templado.

Fuente: (Smith & Hashemi, 2006, pág. 298)

Tabla 4.  
Subdivisiones de tratamiento térmico

Subdivisión	Descripción
T 1	Envejecido de manera natural
T 3	Trabajada en frío y envejecida naturalmente hasta que alcanza una condición sustancialmente estable
T 4	Envejecida de manera natural hasta que su condición es sustancialmente estable
T 5	Enfriado a partir de un proceso de moldeo a temperatura alta y luego envejecido artificialmente
T 6	Sometida a tratamiento térmico y luego envejecida artificialmente
T 7	Sometida a tratamiento térmico y estabilizada
T 8	Sometida a tratamiento térmico trabajada en frío y luego envejecida artificialmente

Nota: La nomenclatura mostrada en la subdivisión describe cada tipo de proceso al cual ha sido conformado la aleación de aluminio.

Fuente: (Smith & Hashemi, 2006, pág. 298)

La subdivisión de aleaciones forjadas se comprende en dos tipos: aleaciones no tratables térmicamente y aleaciones tratables térmicamente.

#### **a. Aleaciones de aluminio no tratables térmicamente**

Estas aleaciones se caracterizan al no poder aumentar su resistencia mediante un proceso de precipitación, por lo cual únicamente se las trabaja en frío. De acuerdo al elemento aleante las series principales son: 1xxx, 3xxx, 5xxx (Smith & Hashemi, 2006, pág. 299).



## **b. Aleaciones de aluminio tratables térmicamente**

Estas aleaciones logran incrementar su resistencia por el proceso de precipitación mediante un tratamiento térmico, el cual consiste en realizar una dispersión densa y fina de partículas precipitadas mediante calor. Las series principales son: 2xxx, 6xxx, 7xxx (Smith & Hashemi, 2006, pág. 299).

### **1.6 Composición y aplicaciones del Aluminio**

De acuerdo a su composición química las aleaciones forjadas permiten desarrollar gran variedad de aplicaciones dentro de la industria metal mecánica, como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5.

Composición y Aplicaciones del Aluminio

<b>Número de Aleación*</b>	<b>Composición química (% en peso) +</b>	<b>Aplicaciones</b>
<b>Aleaciones forjadas</b>		
1100	99.0 min Al, 0.12 Cu	Trabajos en lámina de metal, material para aletas
3003	1.2 Mn	Recipientes de presión, equipo químico, trabajos en lámina de metal
5052	2.5 Mg, 0.25 Cr	Usos marítimos autobuses y camiones, tubos hidráulicos
2024	4.4 Cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn	Estructuras aeronáuticas
6061	1.0 Mg, 0.6 Si, 0.27 Cu, 0.2 Cr	Estructuras de camiones y marítimas, tuberías, balastradas
7075	5.6 Zn, 2.5 Mg, 1.6 Cu, 0.23 Cr	Estructuras aeronáuticas

Nota: \*Numero de la Aluminum Association.

+ El resto de la composición es aluminio.

Fuente: (Smith & Hashemi, 2006, pág. 300)

## **1.7 Duraluminio**

Son aleaciones de aluminio sometidas a tratamientos térmicos y procesos de envejecimiento natural, para así obtener altas propiedades mecánicas. Las series de mayor utilización debido a su buena formalidad, soldabilidad, maquinabilidad y alta resistencia a la corrosión, son las de 2xxx y 7xxx, es por ende su valiosa aplicación (Arbol de tinta SAS, 2014, pág. 15).

### **1.7.1 Serie 7xxx**

La serie siete mil corresponde a las aleaciones de Aluminio con Zinc, compuesto en cantidades del 1% hasta el 8%, para ser trabajadas térmicamente se las combina con una cantidad menor de magnesio influyendo en el alto nivel de resistencia. Para obtener una mejor templabilidad son sometidas a combinaciones con zirconio y titanio en cantidades menores a 0.25 (Arbol de tinta SAS, 2014, pág. 15).

El sobre envejecimiento ligero realizado en esta serie, influye de manera positiva en la resistencia mecánica, de corrosión y de fractura, obteniendo grandes beneficios para su utilización en el mercado. La aleación más frecuente en esta serie es la 7075.

### **1.7.2 Prodax**

La aleación de aluminio 7075 (AA 7075 –T6) denominada en catálogos de materiales como prodax, es una de las más comercializadas en la industria de moldes y matrices debido a sus propiedades de resistencia y buena estabilidad adquiridas mediante el proceso especial de estiramiento en frío para aliviar tensiones.

#### **a. Características**

La utilización del prodax se ve reflejado en distintos tipos de herramientas y especialmente en moldes para plásticos, debido a sus características de mecanizado,

peso, conductividad térmica, estabilidad, resistencia y tratamientos superficiales. Ver tabla 6.

Tabla 6.  
Características del PRODAX.

<b>Tipo</b>	<b>Descripción</b>
<b>Excelente mecanizado</b>	Altas velocidades de corte, tiempos de mecanizado reducidos, menos costo de herramental, entregas más rápidas.
<b>Bajo peso</b>	Bajo peso en relación de 1 a 3 respecto al acero, hace el manejo del herramental más fácil y sencillo. Su baja inercia hace posible acelerar el tiempo de cierre y apertura de los moldes.
<b>Alta conductividad térmica</b>	Se reduce el tiempo de los ciclos y se pueden utilizar sistemas de enfriamiento menos complicados
<b>Buena estabilidad</b>	La operación especial de alivio de tensiones garantiza una deformación mínima durante y luego del mecanizado.
<b>Buena resistencia a la corrosión</b>	Buena resistencia contra todos los plásticos utilizados habitualmente.
<b>Apropiado para tratamientos superficiales</b>	Prodax es adecuado para realizar anodizado duro, cromado duro, o niquelado, para incrementar su dureza, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión.

Nota: El duraluminio tiene varias características que hacen acceder al fácil mecanizado respecto a otros materiales de la industria metalmecánica.

Fuente: (Axxecol S.A, 2016)

## **b. Áreas de aplicación**

En la fabricación de prototipos y series de moldeo el prodax ha crecido notoriamente debido a las propiedades y características que presenta, junto al ahorro que representa la utilización del mismo tanto en tiempos como en costos (Axxecol S.A, 2016). En la tabla 7 se describe las aplicaciones del aluminio 7075.

Tabla 7.  
Áreas de aplicación

Categoría del herramental	Proto tipos	Series cortas	Series medianas	Series largas
Moldes de soplado	X	X	X	X
Formado al vacío	X	X	X	X
Moldeado de espuma	X	X	X	(X)
Moldes	X	X	X	(X)
Moldes de inyección de termoplásticos	X	X	(X)	
Moldeo de goma	X	X		
Placas contenedoras y de apoyo, quías y sujetadores				

Nota: Las aplicaciones del duraluminio son más comunes en la producción en serie de moldes para polímeros y componentes plásticos.

Fuente: (Axxecol S.A, 2016)

### c. Datos de mecanizado

Los valores guías considerados para el proceso de mecanizado en la fresadora se encuentran en el catálogo de Axxecol S.A, 2016, como se observa en la tabla 8 y 9, los mismos que deberán ser adaptados a las condiciones locales.

Tabla 8.  
Fresado frontal

Fresado frontal y de escuadrado				
	Fresado grueso con metal duro	Fresado fino con metal duro	Fresado fino con PCD <sup>1)</sup>	Fresado con acero rápido
Velocidad de corte ( $V_c$ ) m/min a.p.m	600-1000 1980-3300	1000-3000 3300-9900	800-4000 2650-13200	250-400 825-1320
Avance ( $f_z$ ) mm/diente Pulg/diente	0,2-0,6 0,008-0,024	0,1-0,2 0,004-0,008	0,05-0,2 0,002-0,008	-0,4 -0,016
Profundidad de corte ( $a_p$ ) Mm Pulgadas	2-8 0,08-0,32	-2 -0,08	-2 -0,08	-8 -0,32
Designación del metal duro ISO	K20	K10	-	-
<sup>1)</sup> Diamante poli cristalino				

Nota: En cada parámetro establecido como  $V_c$ ,  $f_z$  y  $a_p$  mostrara el límite inferior y superior del proceso de fresado con distinta herramienta de corte.

Fuente: (Axxecol S.A, 2016)

Tabla 9.  
Fresado de acabado

Fresado de acabado			
	Placa sólida de metal duro	Inserto indexable de metal duro	Acero rápido
Velocidad de corte ( $V_c$ ) m/min a.p.m	300-500 990-1650	300-500 990-1650	120-250 400-825
Avance ( $f_z$ ) mm/diente Pulg/diente	0,03-0,20 <sup>1)</sup> 0,001-0,008 <sup>1)</sup>	0,1-0,2 <sup>1)</sup> 0,003-0,008 <sup>1)</sup>	0,05-0,35 <sup>1)</sup> 0,002-0,014 <sup>1)</sup>
Designación del metal duro ISO	K20	K20	-
<sup>1)</sup> Dependiendo de la profundidad de corte radial y del diámetro del corte			

Nota: En cada parámetro establecido como  $V_c$  y  $f_z$  describe el límite inferior y superior del proceso de fresado con distinta herramienta de corte.

Fuente: (Axxocol S.A, 2016)

## 1.8 Procesos de manufactura

El método tradicional para la construcción de piezas mecánicas consistía en impresiones de piezas técnicas para posteriormente ser manufacturadas con máquinas-herramientas convencionales y procesos de maquinado hasta la era de las computadoras y la introducción del control numérico (Krar, Gill, & Smid, 2009).

Todos los productos manufacturados están hechos de diferentes tipos de materiales. Por tal razón se debe considerar las propiedades de éstos y al mismo tiempo, es preciso pensar en el proceso de fabricación.

Aunque las propiedades de un material pueden ser aceptables se debe considerar las condiciones de trabajo a las cuales se somete a las piezas, pues en ciertos casos una incorrecta selección afecta la efectividad deseada, obteniendo una forma inútil.

Así mismo, desde la estructura microscópica de los materiales a menudo cambia a través de los distintos procesos de fabricación, depende del proceso de variaciones en la fabricación técnica que influirán en el producto final.

En esta sección se representará los procesos de fabricación utilizados en la industria hoy en día para producir piezas y partes específicas o en ciertos casos puede requerir una combinación de procesos con el fin de facilitar su realización.

Hay que mencionar que procesos descritos a continuación son para los metales. Para los procesos de fabricación de polímeros y cerámicas existen otras técnicas.

Generalmente hay más de un proceso para producir una pieza de un material dado. La tabla 10 contiene las categorías generales:

Tabla 10.  
Procesos de Manufactura

<u>Metal Casting</u>	Expandable mold and permanent mold
<u>Metal Forming &amp; shaping</u>	Rolling, forging, extrusion, drawing, sheet forming, powder metallurgy, and molding.
<u>Plastics Molding &amp; Forming</u>	Blow Molding, CNC Machining, Centrifugal Casting, Continuous Strip Molding, Compression Molding, Profile Extrusion, Continuous Lamination, Injection Molding, Filament Winding, thermoforming, Vacuum Forming, Pressure Bag Molding, Pressure Forming, Pulshaping, Twin Sheet Forming, Pultrusion, Liquid Resin Molding, Reaction Injection Molding (RIM), Rotational Molding, Resin transfer Molding (RTM)
<u>Rapid Prototyping</u>	Stereo lithography – SLA or SL, 3D Printing - 3DP, Selective Laser Sintering - SLS, Fused-Deposition Modeling - FDM, Solid-Ground Curing - SGC, Laminated Object Manufacturing - LOM, Multi-Jet Modeling - MJM, Direct Shell Production Casting DSPC, Polyjet Technology, Laser Engineered Net Shaping – LENS
<u>Joining</u>	Welding, brazing, soldering, diffusion bonding, adhesive bonding, and mechanical joining.
<u>Machining</u>	Turning, boring, drilling, milling, planing, shaping, broaching, grinding, ultrasonic machining, chemical, electrical, and electrochemical machining and high-energy beam machining
<u>Finishing Operations</u>	Honing, lapping, Polishing, burnishing, deburring, surface treating, coating and plating processes.

Nota: Todos los elementos descritos representan las formas como el duraluminio puede ser procesado desde materia prima hasta convertirse en un producto terminado.

Fuente: (Engineers Handbook, 2004)

## **1.9 El Control Numérico**

El sector industrial en el país está apostando cada vez a los controles computarizados, los cuales aprovechan la arquitectura de una computadora personal (PC) para permitir al usuario implementar funciones propias, poniendo a su alcance muchos recursos internos del control.

Ahora bien, Control Numérico Computarizado, tres palabras que se han ido popularizando en los últimos años, aunque mayoritariamente se utiliza las siglas CNC, y en definición es que la PC convierte el diseño producido por el software de diseño asistido por computadora en códigos alfanuméricos, éstos pueden considerarse como las coordenadas en un gráfico y controlan el movimiento de la herramienta de corte. (V. Ryan, 2009, pág. 1)

De esta manera, el hardware y software que ha sido desarrollado para el entorno PC puede ser utilizado directamente en los CNC. La integración con periféricos, adquisición de datos, entre otros se solucionan fácilmente con sistemas comerciales de terceros, diferentes de los fabricantes de CNCs (Castro, 2008, pág. 19).

## **1.10 Factores de mecanizado**

En el proceso de mecanizado se puede encontrar factores que influyen en la calidad superficial, estos son:

- Velocidad de corte.
- Avance de herramienta
- Profundidad de mecanizado

Los términos antes mencionados se describen de la siguiente manera:

### **1.10.1 Velocidad de corte**

Es la velocidad lineal en base al punto de la periferia de la pieza que se encuentra en contacto con la herramienta, se expresa en metros por minuto (m/min), el valor correcto depende especialmente del material que se destina a ser mecanizado o a su vez depende de las características técnicas de la herramienta.

Ecuación 1. Velocidad de corte

$$V_c = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{1000}$$

Donde:

V<sub>c</sub>= velocidad de corte (m/min)

D= diámetro de la herramienta (mm).

n= velocidad de giro (rpm)

### **1.10.2 Avance de la herramienta**

Se describe como el desplazamiento de la pieza respecto a la herramienta en un periodo de tiempo específico y viene dispuesto en milímetros por revolución o en milímetros por minuto.

### **1.10.3 Profundidad de mecanizado**

Es el material desprendido de la superficie de la pieza en una pasada de la herramienta, la unidad de medida es en milímetros (mm).

## **1.11 Controlador CNC**

### **1.11.1 Definición.**

Un controlador es el agente precursor del cifrado e interpretación de la codificación G para ser transmitida hacia la ejecución de movimientos predeterminados en el proceso de mecanizado en el CNC, normalmente los controladores son los encargados del control y movilidad de las fresadoras CNC.



Las partes que se pueden especificar son los drivers e interfaces los cuales están vinculados directamente con los motores como en el caso de los drivers o por otro lado la interfaz que se conecta las entradas y salidas de información de datos como conectar el ordenador computarizado con los otros accesorios del centro de mecanizado.

#### **1.11.2 Tipos de controladores.**

Actualmente la alta gama de fabricantes han generado sus propios tipos de controladores como los enunciados a continuación: FANUC, SIMUMERIK, MITSUBISHI, FAGOR, etc.

#### **1.11.3 Codificación G y M en el controlador FANUC**

La codificación es interpretada como el lenguaje propio de los controladores como el FANUC, en donde este estipula dos típicos códigos que rigen a este sistema los “G” y los “M” donde los códigos “G” poseen dos tipos los modales y no modales que se diferencian por su activación tras la implementación de otro código y así mismo el uso en solo un bloque de codificación como se lo puede visualizar en el Anexo 1.

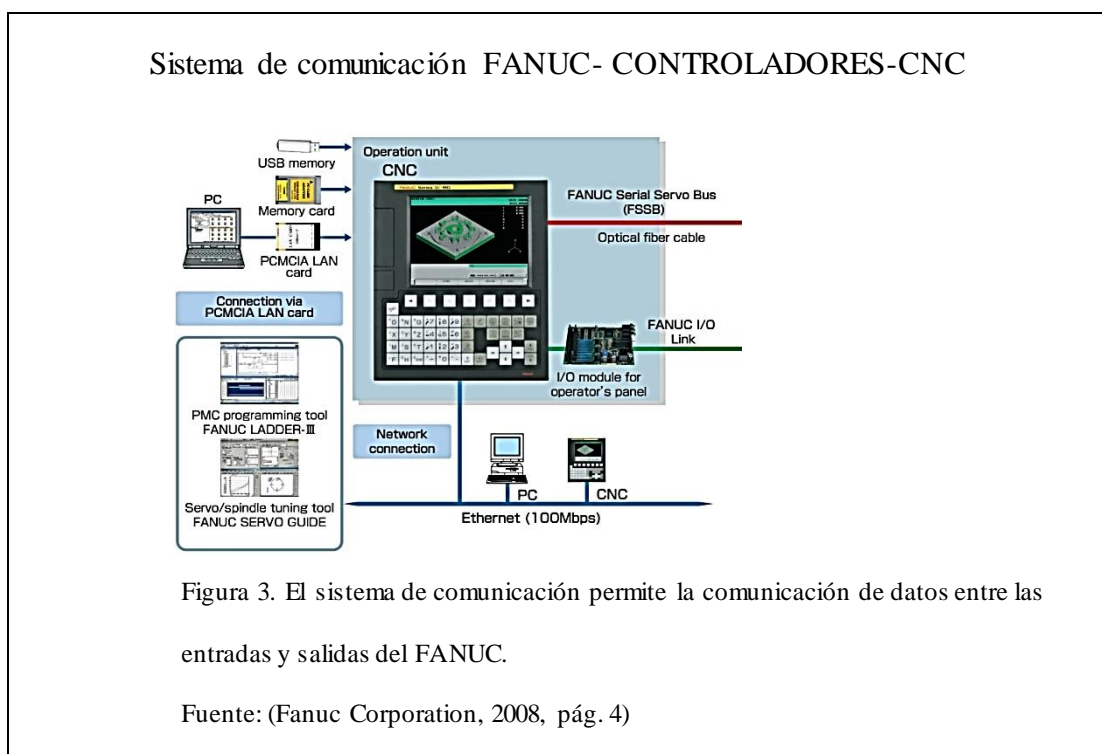
Por otro lado la codificación “M” es la que define órdenes más específicas en el centro de mecanizado como paradas en el proceso, encendido, orientaciones de husillos, cambios de herramientas, etc. En el Anexo 2 se muestra los distintos tipos de códigos M.

#### **1.11.4 FANUC serie OI-MD.**

Los controladores FANUC de la serie Oi-MD es un dispositivo digital que tiene como oficio manejar herramientas, posiciones y los factores de mecanizado, están diseñados para la ejecución de órdenes y movimientos controlados por medio de una secuencia de los motores de trabajo, siendo estos los que reciben la información de trabajos en cinco ejes como en el caso de la ya mencionada serie Oi, los cuales

funcionan perfectamente con los motores del cabezal, actualmente las últimas versiones vienen equipadas con funciones como Ethernet, puertos USB y memorias SD las cuales facilitan la transmisión de datos. Ver figura 5

La serie Oi se basa en la nano interpolación la cual sirve para cumplir más a cabalidad las calidades de acabado superficial ya que al utilizarla genera posicionamiento en manómetros provocando así trayectorias de avance de más exactitud y mejores calidades superficiales a altas velocidades.



### 1.12 Centro de mecanizado Leadwell v20i.

En la serie L2TAJ0103 de los centros de mecanizado Leadwell V20i fabricados en Taiwán tienen grandes ventajas como su capacidad de producción, recorrido de herramientas, velocidades de avance y cantidades de herramientas. En el Anexo 3 se muestra las características que posee el modelo V-20i.

## **1.13 Sistemas CAD/CAM**

### **1.13.1 Definición de sistema CAD/ CAM.**

Uno de los primordiales sistemas de herramientas es el CAD “Computer Aided Design” (Diseño asistido por computador) el cual permite ilustrar componentes en 2D y 3D que facilitan tener dimensiones que optimizan la recolección de datos para la graduación y administración, estos servirán próximamente en los procesos de manufactura.

El sistema CAM “Computer Aided Manufacturing” (Manufactura asistida por computador) es un método de simulación y de control de resultados en los procesos de producción de piezas, en donde bajo una ejecución de parámetros se logra obtener los códigos de programación y así distribuir a los controladores encargados de la transmisión.

### **1.13.2 InventorCAM.**

El InventorCAM utiliza esto dos tipos de sistemas asistidos por computador para ahorrar tiempo de producción hasta un 70% más del proceso de mecanizado y extender la vida de las herramientas considerablemente ya que se adapta completamente a las trayectorias de los diseños realizados en Autodesk Inventor.

Este sistema CAD/CAM al que se rige el software es de gran utilidad al adaptar automáticamente configuraciones de cambios de herramientas, mesas de máquinas, tornillos de banco y generación de nuevos códigos del controlador Fanuc tras los cambios realizados en los modelos en 3D, como se presenta en la figura 4.

## Simulación de mecanizado en InventorCAM

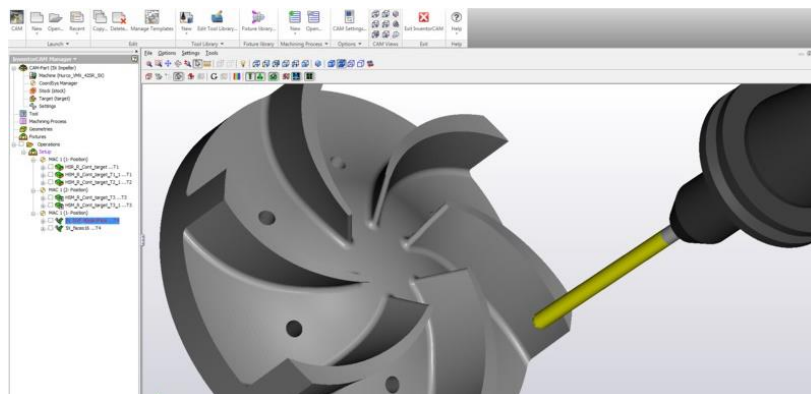


Figura 4. Simulación de mecanizado por medio de la generación de códigos y llamado de herramientas de manera automáticas.

Fuente: (SolidCAM Ltd., 2016, pág. 1)

La gran ventaja de poder utilizar el software InventorCAM es el reconocimiento de varios factores que mejoran y estabilizan el proceso de mecanizado como lo son el 2.5D Milling, HSR/HSM 3D y iMachine 3D.

Donde el 2.5 D Milling puede proporcionar la creación de trayectorias más sencillas en el fresado CNC y mejora considerablemente el manejo del sistema CAD al trabajar en conjuntos de piezas y geometrías bocetadas.

El HSR/HSM 3D cuenta primordialmente con la ejecución de operaciones en alta velocidad que garantiza el contacto de la herramienta con la pieza constantemente incluso con la evasión de ángulos que son los que suelen emitir ciertas alertas al momento de la ejecución del programa y en el mecanizado de acabados más finos, a su vez este es muy eficiente en moldes, herramientas y unidades aeroespaciales.

Por otro lado el iMachine 3D puede conseguir la optimización de tiempo de hasta un 90% con la automatización de la programación CNC y anteponiendo condiciones altamente importantes como el inicio de corte, los paros entre procesos y el excelente reconocimiento de partes enteras en 3D.

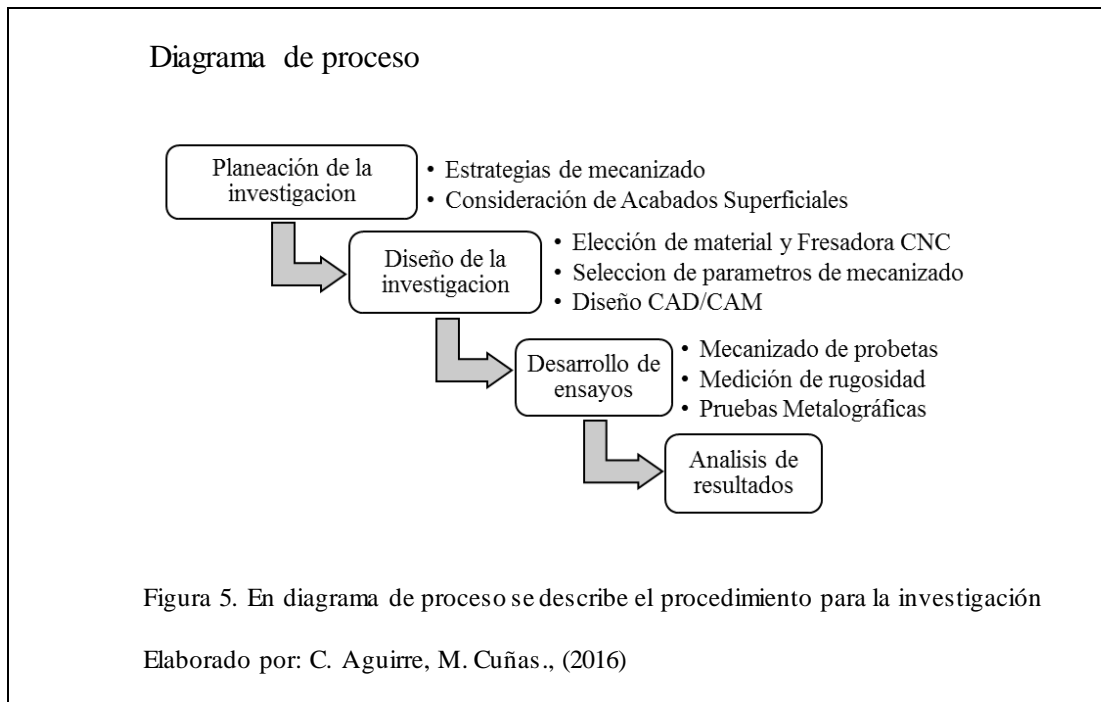
## Capítulo 2

### 2 Desarrollo experimental

El estudio de los procesos de mecanizado para mejorar las calidades superficiales se basan en la variación de factores mecánicos de corte, los mismos que influyen en el aspecto superficial de la pieza. Las probetas tratadas tienen por objetivo demostrar los distintos aspectos superficiales mediante el fresado de desbaste y acabado a través de la variación de datos (velocidad de corte, avance de la herramienta, profundidad de corte) ya establecidos en la tabla 8 y tabla 9 respectivamente, utilizando una herramienta de acero rápido.

Realizar un análisis detenido para controlar todos los parámetros influyentes de corte sería demasiado extenso, ya que sin duda existen muchos más que los antes mencionados, como son: uso de refrigerante, material de la herramienta, diámetro de la herramienta, desgaste de la herramienta, etc., por lo cual se ha optado por obtener datos viables, concisos y útiles, definiendo el diámetro de la herramienta (Fresa de acero rápido, diámetro 20 mm), la utilización constante de 10 l/min de refrigerante en el centro de mecanizado, al realizar el planeado sobre la superficie se seleccionó la estrategia de corte en *un sentido* como se ilustra en la figura 15 y 16, en función del desplazamiento de la herramienta por el ancho propuesto de 19 mm, al adecuarse correctamente en la probeta diseñada, evitando esquinas con radios extremadamente grandes y a su vez tiempos de maquinados muy extensos.

En la figura 5 se ilustra un diagrama de proceso perteneciente a la investigación.



## 2.1 Selección de parámetros de corte para el mecanizado

De acuerdo al catálogo del material según Axxecol S.A (2016), para el fresado del Prodax A-7075 los parámetros de corte recomendables son tres: velocidad de corte, avance de la herramienta y profundidad de corte. Ver tabla 11.

Para la elección de la herramienta de corte se eligió como medida estándar, una fresa de Acero Rápido (HSS) de 20 mm de diámetro con 4 filos cortantes, con el fin de optimizar el tiempo y que a la vez satisfaga los análisis experimentales.

En la elección de la herramienta de Acero Rápido (HSS) se puede justificar su uso ya que la remoción de material es lo más importante para la mayoría de fabricantes primordialmente en la fabricación de moldes y en el campo aeroespacial en el cual el Aluminio Prodax es muy utilizado, al representar los dos tipos de herramientas HSS y Carburo de Tungsteno se puede determinar que al ser utilizada para desbaste de elementos puede tornarse frágil, mostrar inicio de picado en los insertos a altas velocidades y avances elevados. Lo cual formaría parte de un inconveniente en el momento de realizar la medición de rugosidades (Danford, 2009, pág. 1).

En el HSS las picaduras no son muy propensas, por lo que se lograría mecanizar una superficie más uniforme. (Danford, 2009, pág. 1).

Tabla 11.  
Parámetros de corte del material Prodax

Fresado frontal y de escuadrado		Fresado de acabado
Herramienta	Acero rápido	Acero Rápido
Velocidad de corte ( $V_c$ ) m/min a.p.m	250-400 825-1320	120-250 400-825
Avance ( $f_z$ ) mm/diente Pulg/diente	-0,4 -0,016	0,05-0,35 0,002-0,014
Profundidad de corte ( $a_p$ ) Mm Pulgadas	-8 -0,32	

Nota: Se representa el rango para el proceso de mecanizado con una herramienta HSS.

Fuente: (Axxecol S.A, 2016)

Con los datos máximos de corte en el fresado frontal, se calcula las revoluciones de giro necesarias para el husillo, partiendo de la ecuación 1 donde:

$$V_c = 400 \text{ m/min}$$

$$D = 20 \text{ mm}$$

(Ec. 1)

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{D \cdot \pi}$$

$$n = \frac{400 \text{ m/min} \cdot 1000}{20 \text{ mm} \cdot \pi}$$

$$n = 6366.18 \text{ RPM}$$

La selección del avance de la herramienta de corte generalmente se realiza en dos sistemas:

- El avance es proporcionado desde el eje principal

Ecuación 2. Avance en milímetros por vuelta.

$$Av = f_z \cdot Z \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

Av= avance en milímetros por vuelta (mm/vuelta)

$f_z$ = Avance en milímetros por diente de la fresa (mm/diente)

Z= número de dientes de la fresa

- El avance se obtiene directamente desde el motor principal

Ecuación 3. Avance en milímetros por minuto.

$$Am = f_z \cdot Z \cdot n \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

Am= avance en milímetros por minuto (mm/min)

$f_z$ = Avance en milímetros por diente de la fresa (mm/diente)

Z= número de dientes de la fresa

n= número de revoluciones por minuto (RPM)

Mediante la variación de los parámetros de velocidad de corte recomendada en el catálogo del material Prodax se demostraron los siguientes resultados. Ver tabla 12.

Tabla 12.

Parámetros de velocidad de corte para desbaste.

<b>PARÁMETROS DE MECANIZADO CON ACERO RÁPIDO <math>f_z = 0.4</math> máx.</b>							
<b>Nº</b>	<b>Vc m/min</b>	<b><math>f_z</math> mm/diente</b>	<b>Z Nº filos</b>	<b>D (mm)</b>	<b>RPM</b>	<b>Av mm/vuelta</b>	<b>Am mm/min</b>
1	250	0.4	4	20	3978.8	1.6	6366.2
2	300	0.4	4	20	4774.6	1.6	7639.4
3	350	0.4	4	20	5570.4	1.6	8912.7
4	400	0.4	4	20	6366.1	1.6	10185.9

Nota: Para el mecanizado se estipulan valores constantes  $f_z$ , Av, Z y D, los demás cambian en torno a la variación de Vc.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)



Los resultados demostrados en la tabla 12 trajeron como consecuencia RPM y avances de la herramienta muy elevados, los mismos que son inapropiados para realizar el trabajo mediante el inventorCAM Demo y a su vez en el centro de mecanizado. Sin embargo para reducir riesgos de vibración en la máquina y de ruptura de la herramienta, se realizó una reducción de velocidades de corte, deduciendo que los valores descritos en el catálogo hacen referencia a un solo filo de corte de la fresa, es por eso, que para los nuevos valores se tomó en cuenta esta condición siendo la alternativa más apropiada para mecanizar el material, en sí se redujo en un cuarto a los límites establecidos por el proveedor de aluminio PRODAX, debido a los 4 filos que presenta la herramienta, en la tabla 13 se definen los valores límites máximos.

Tabla 13.

Nuevos parámetros de velocidad de corte para desbaste

	<b>PARÁMETROS DE MECANIZADO CON ACERO RÁPIDO <math>f_z=0.4</math> máx.</b>						
<b>Nº</b>	<b>Vc m/min</b>	<b>Fz mm/diente</b>	<b>Z Nº filos</b>	<b>D (mm)</b>	<b>RPM</b>	<b>Av mm/vuelta</b>	<b>Am mm/min</b>
1	62.5	0.4	4	20	994.7	1.6	1591.6
2	75	0.4	4	20	1193.6	1.6	1909.8
3	87.5	0.4	4	20	1392.6	1.6	2228.2
4	100	0.4	4	20	1591.5	1.6	2546.5

Nota: Se determina el cambio de parámetros debido a la nueva consideración de 4 filos cortantes, lo que provoca una disminución en la Vc, RPM y Am.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

## 2.2 Variación de parámetros de corte para el mecanizado de desbaste

Los datos descritos anteriormente en la tabla 13 serán utilizados como las nuevas condiciones para la ejecución del mecanizado, de igual manera el rango de variación de avance por diente será subdividido en cuatro nuevas condiciones considerando la mínima, la máxima y dos intermedias (0,1; 0,2; 0,3; 0,4).

Adicionalmente se ha integrado dos parámetros generales de profundidad de desbaste para poder conocer cuáles serían las repercusiones en el proceso de corte siendo estas de 2 mm y de 4 mm. Ver tabla 14 y tabla 15.

Tabla 14.

Ensayo N° 1 Variación de velocidad de corte, avance por diente, profundidad

ENSAYO N° 1 DESBASTE								
N° Probeta	Vc m/min	fz mm/diente	Prof. Corte (mm)	Z N° filos	D (mm)	RPM	Av mm/vuelta	Am mm/min
1	62,5	0,1	2	4	20	994,7	0,4	397,9
2	75	0,1	2	4	20	1193,7	0,4	477,5
3	87,5	0,1	2	4	20	1392,6	0,4	557
4	100	0,1	2	4	20	1591,6	0,4	636,6
1	62,5	0,2	2	4	20	994,7	0,8	795,8
2	75	0,2	2	4	20	1193,7	0,8	954,9
3	87,5	0,2	2	4	20	1392,6	0,8	1114,1
4	100	0,2	2	4	20	1591,6	0,8	1273,2
1	62,5	0,3	2	4	20	994,7	1,2	1193,7
2	75	0,3	2	4	20	1193,7	1,2	1432,4
3	87,5	0,3	2	4	20	1392,6	1,2	1671,1
4	100	0,3	2	4	20	1591,6	1,2	1909,9
1	62,5	0,4	2	4	20	994,7	1,6	1591,6
2	75	0,4	2	4	20	1193,7	1,6	1909,9
3	87,5	0,4	2	4	20	1392,6	1,6	2228,2
4	100	0,4	2	4	20	1591,6	1,6	2546,5

Nota: Con los valores ya determinados anteriormente se calcula cada valor con la variación de fz manteniendo una profundidad de corte constante de 2mm, siendo así que se obtendrían los valores para las primeras 16 probetas.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Tabla 15.

Ensayo N° 2 Variación de velocidad de corte, avance por diente, profundidad

ENSAYO N° 2 DESBASTE								
N° Probeta	Vc m/min	fz mm/diente	Prof. Corte (mm)	Z N° filos	D (mm)	RPM	Av mm/vuelta	Am mm/min
1	62,5	0,1	4	4	20	994,7	0,4	397,9
2	75	0,1	4	4	20	1193,7	0,4	477,5
3	87,5	0,1	4	4	20	1392,6	0,4	557
4	100	0,1	4	4	20	1591,6	0,4	636,6
1	62,5	0,2	4	4	20	994,7	0,8	795,8
2	75	0,2	4	4	20	1193,7	0,8	954,9
3	87,5	0,2	4	4	20	1392,6	0,8	1114,1
4	100	0,2	4	4	20	1591,6	0,8	1273,2
1	62,5	0,3	4	4	20	994,7	1,2	1193,7
2	75	0,3	4	4	20	1193,7	1,2	1432,4
3	87,5	0,3	4	4	20	1392,6	1,2	1671,1
4	100	0,3	4	4	20	1591,6	1,2	1909,9
1	62,5	0,4	4	4	20	994,7	1,6	1591,6
2	75	0,4	4	4	20	1193,7	1,6	1909,9
3	87,5	0,4	4	4	20	1392,6	1,6	2228,2
4	100	0,4	4	4	20	1591,6	1,6	2546,5

Nota: Aplicando el método de cálculo y manteniendo el lineamiento de constancia de Vc, Z, Av y distancia de perforación se hallaran los nuevos 16 parámetros para las probetas a ser mecanizadas con 4 mm de profundidad de corte.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

### 2.3 Variación de parámetros de corte para el mecanizado de acabado

Los parámetros de mecanizado de acabado son datos especificados por el distribuidor, de igual manera se ha considerado reducir en un cuarto la velocidad de corte y el avance se ha subdividido en tres parámetros, mínimo, máximo e intermedio, ya que las fronteras de avance mm/diente son muy cortas y su rango minúsculo (0.05; 0,2; 0,35).

En este caso la profundidad de corte es de 1 mm y 0.2 mm que son óptimos para la obtención de calidades superficiales con la herramienta de acero rápido. Ver tabla 16 y tabla 17.

Tabla 16.

Ensayo N° 3 Variación de velocidad de corte, avance por diente, profundidad

ENSAYO N° 3 ACABADO								
N° Probeta	Vc m/min	fz mm/diente	Prof. Corte (mm)	Z N° filos	D (mm)	RPM	Av mm/vuelta	Am mm/min
1	30	0,05	1	4	20	477,5	0,2	95,5
2	40	0,05	1	4	20	636,6	0,2	127,3
3	50	0,05	1	4	20	795,8	0,2	159,2
4	62,5	0,05	1	4	20	994,7	0,2	198,9
1	30	0,2	1	4	20	477,5	0,8	382
2	40	0,2	1	4	20	636,6	0,8	509,3
3	50	0,2	1	4	20	795,8	0,8	636,6
4	62,5	0,2	1	4	20	994,7	0,8	795,8
1	30	0,35	1	4	20	477,5	1,4	668,4
2	40	0,35	1	4	20	636,6	1,4	891,2
3	50	0,35	1	4	20	795,8	1,4	1114,1
4	62,5	0,35	1	4	20	994,7	1,4	1392,6

Nota: En el acabado se tomara en cuenta una profundidad de corte de 1mm y se utilizara el mismo método de cálculo que dará como resultado la obtención de las siguientes 12 probetas de mecanizado de acabado

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Tabla 17.

Ensayo N° 4 Variación de velocidad de corte, avance por diente, profundidad

ENSAYO N° 4 ACABADO								
N° Probeta	Vc m/min	fz mm/diente	Prof. Corte (mm)	Z N° filos	D (mm)	RPM	Av mm/vuelta	Am mm/min
1	30	0,05	0,2	4	20	477,5	0,2	95,5
2	40	0,05	0,2	4	20	636,6	0,2	127,3
3	50	0,05	0,2	4	20	795,8	0,2	159,2
4	62,5	0,05	0,2	4	20	994,7	0,2	198,9
1	30	0,2	0,2	4	20	477,5	0,8	382
2	40	0,2	0,2	4	20	636,6	0,8	509,3
3	50	0,2	0,2	4	20	795,8	0,8	636,6
4	62,5	0,2	0,2	4	20	994,7	0,8	795,8
1	30	0,35	0,2	4	20	477,5	1,4	668,4
2	40	0,35	0,2	4	20	636,6	1,4	891,2
3	50	0,35	0,2	4	20	795,8	1,4	1114,1
4	62,5	0,35	0,2	4	20	994,7	1,4	1392,6

Nota: Finalmente se considerara 0.2mm de profundidad de corte para la obtención de los últimos 12 parámetros de mecanizado de las probetas.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

## 2.4 Programación en InventorCAM Demo

La utilización del software InventorCAM Demo 2014 permite obtener la simulación del mecanizado en la probeta diseñada, al mismo tiempo genera los procesos de trabajo con sus respectivos los códigos.

A continuación se detalla el procedimiento:

1. El diseño de la probeta se lo realizó en Autodesk Inventor 2016, considerando las medidas generales del material Prodax, cuyas dimensiones son: 140 mm x 100 mm x 25 mm. Ver figura 6.

Diseño de la Probeta

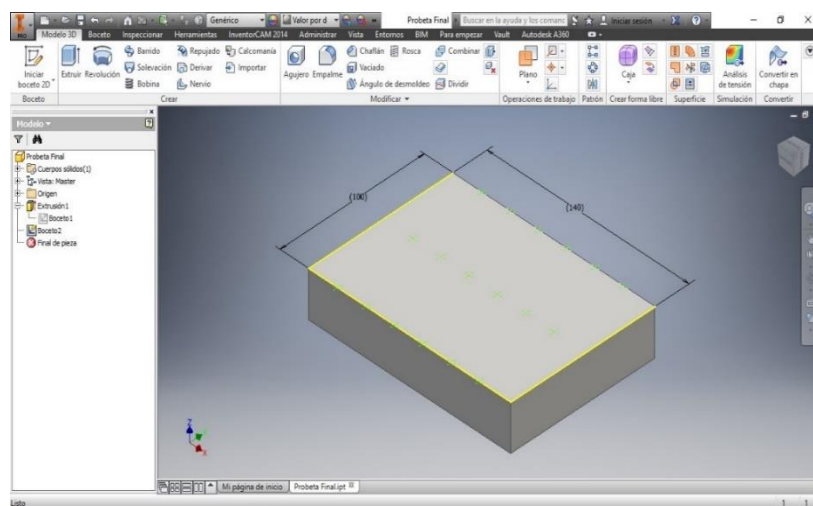


Figura 6. La placa base de aluminio Prodax con dimensiones nominales para el mecanizado de probetas.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

2. Seleccionar el cero pieza en el centro y parte superior de la probeta mediante inventorCAM 2014 Demo (figura 7).

### Selección del cero pieza

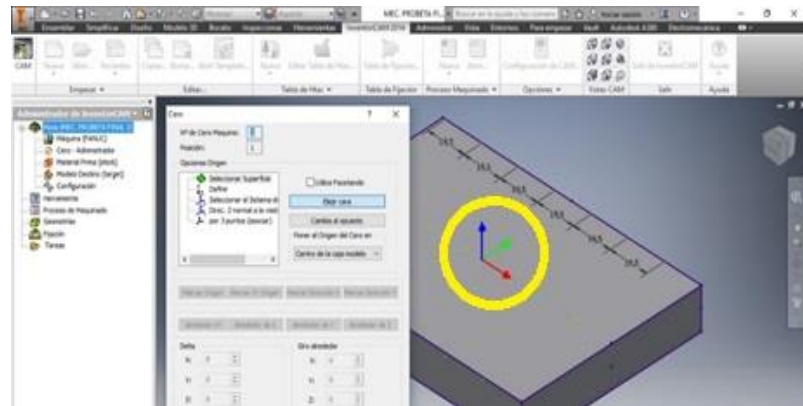


Figura 7. Selección de superficie que registrará como centro de coordenadas para la ejecución del mecanizado.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

3. Seleccionar el material de acuerdo a la dureza de 160 Brinell en Assab Prodax (Axxecol S.A, 2016) - Aluminium 150BHN-81HRB (figura 8.)

### Selección del material Aluminium 150BHN-81HRB

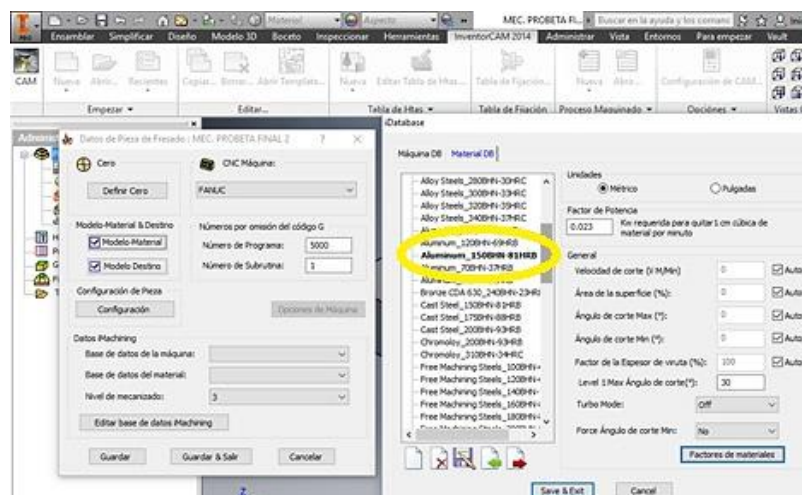


Figura 8. Se determina el tipo de material equivalente al duraluminio.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

4. Mediante la carpeta de tareas se debe añadir la operación de fresado y posteriormente seleccionar la alternativa de careado. (figura 9.)

#### Selección de la operación de fresado

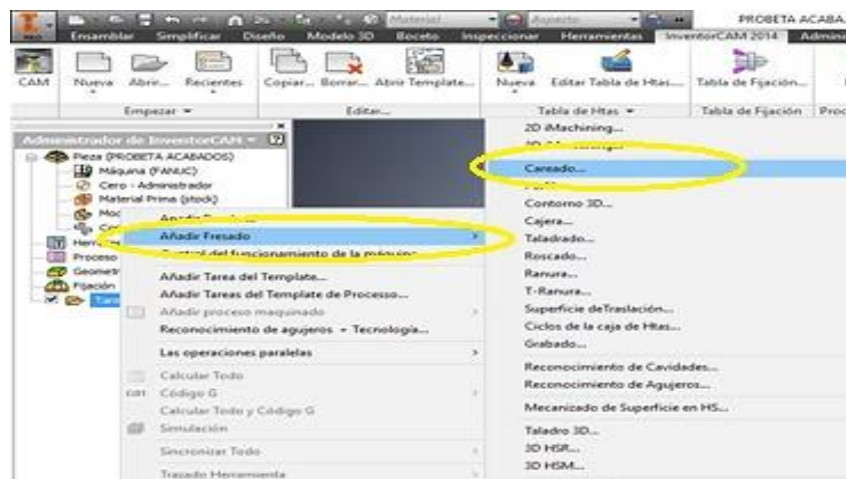


Figura 9. Elección de método de fresado sobre la placa base.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

5. Partiendo de las medidas estándar de la herramienta de corte seleccionada, se define los valores a utilizar. (figura 10.)

#### Definición de la herramienta de corte

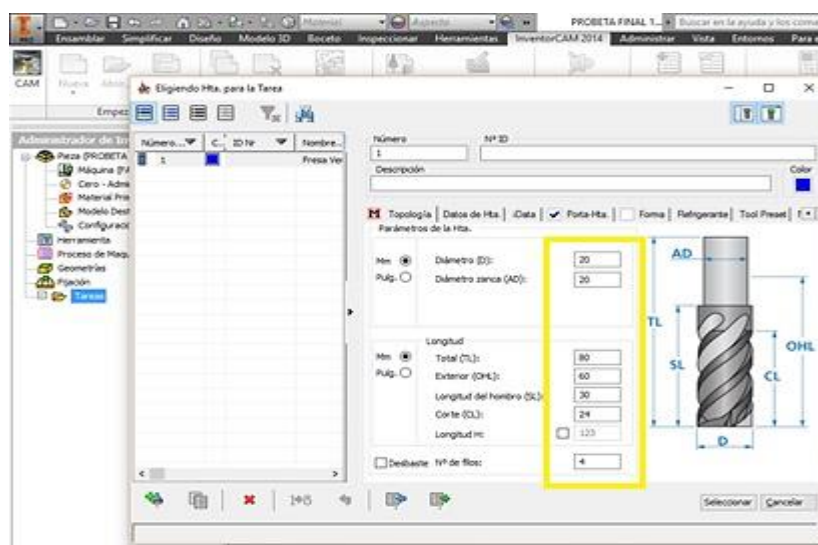


Figura 10. Determinación de características de fresa de botón.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

6. Definir los parámetros de corte de la herramienta en función de las variaciones propuestas en la tabla 18 a la 21 respectivamente. (figura 11.)

#### Parámetros de corte de la herramienta

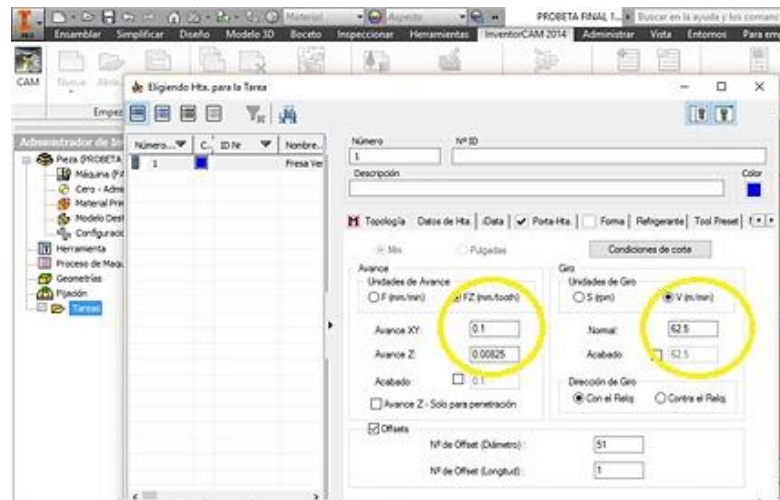


Figura 11. Determinación de parámetros fijos como avance y velocidad de giro en la herramienta.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

7. Seleccionar el material de la herramienta de corte (figura 12.)

#### Selección del material de la herramienta HSS (Acero rápido)

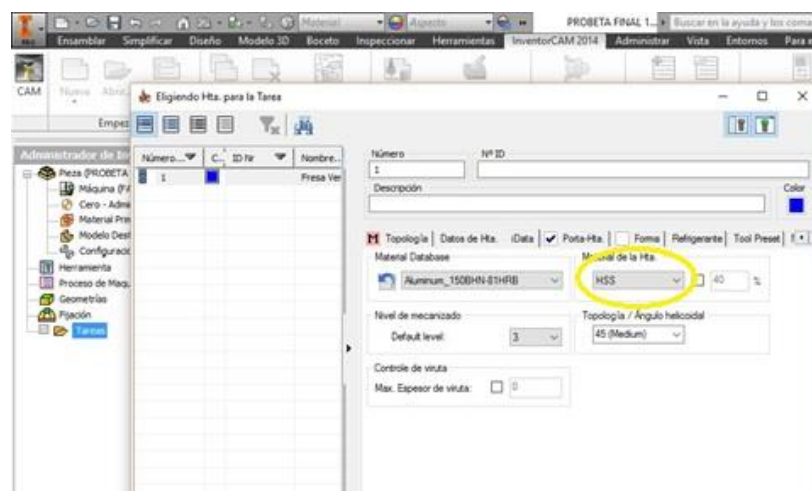


Figura 12. Se determina la composición de la fresa como HSS o acero rápido.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)



8. Seleccionar el cono porta-herramientas adecuado para el centro de mecanizado. (figura 13)

#### Selección del cono porta-herramienta serie BT-40 ER 32X60

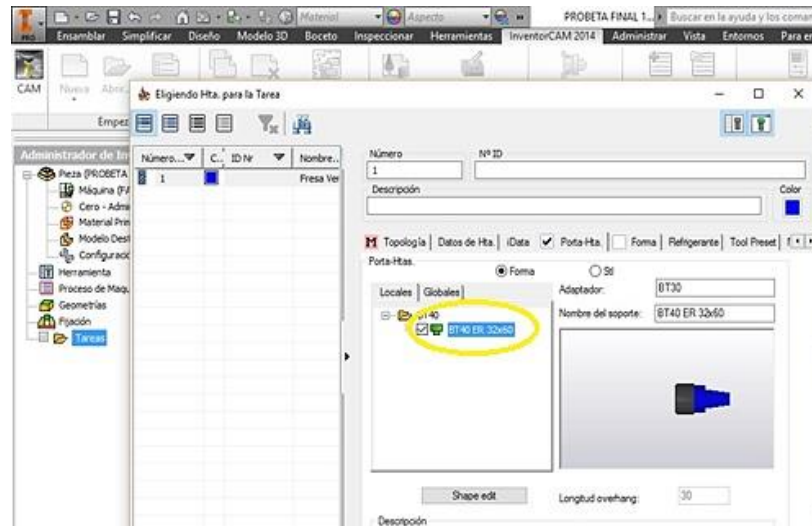


Figura 13. El cono porta-herramientas tiene como finalidad la sujeción de la fresa HSS

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

9. Definir niveles de desplazamiento de la herramienta y niveles de fresado (profundidad de corte y pasada). (figura 14)

#### Profundidad de fresado

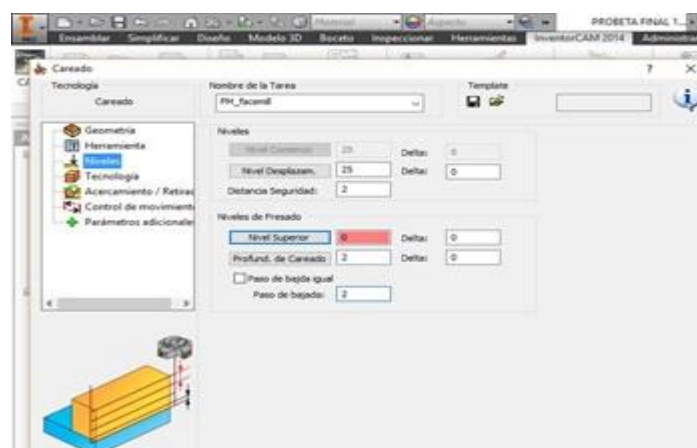


Figura 14. El nivel superior se presenta desde el punto de origen de las coordenada y posterior a aquello de define la profundidad.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

10. Seleccionar la tecnología de mecanizado y ángulo de desplazamiento, basado en la geometría antes descrita. (figura 15, figura 16)

#### Selección de estrategia de mecanizado

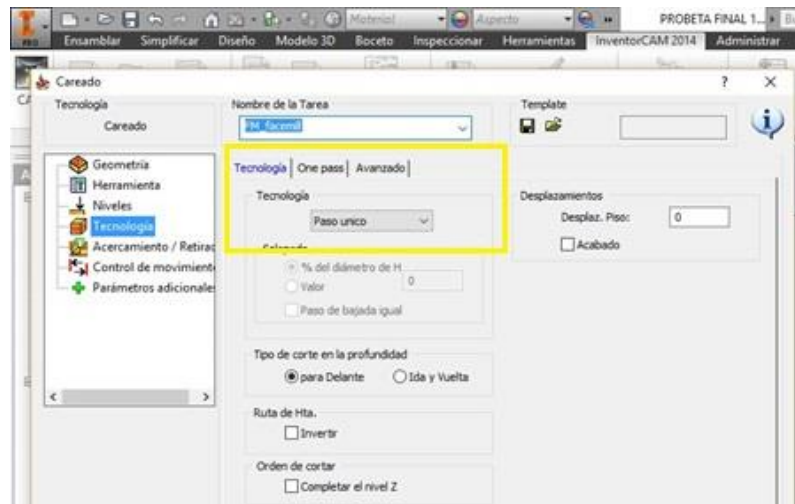


Figura 15. Al considerar la distancia que se desplaza la herramienta la estrategia apropiada es de paso único.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

#### Selección de ángulo de desplazamiento.

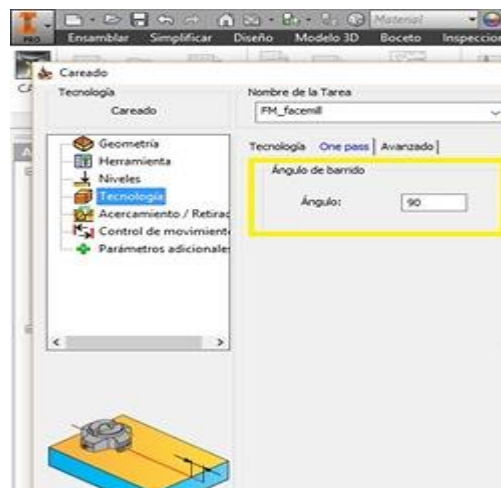


Figura 16. Respecto al eje x se toma los 90 grados de inclinación para el desplazamiento.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

11. Definir los valores de aproximación y retirada de la herramienta.

(Figura 17)

Aproximación y retirada de la herramienta de corte.

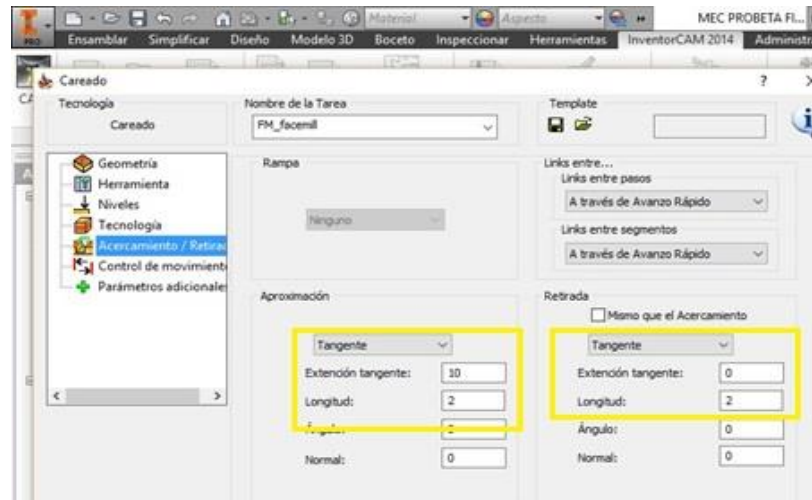


Figura 17. Los valores de entrada y salida dependen del radio de la herramienta.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Los pasos descritos se vuelven reiterativos para la variación de parámetros de corte en cada ensayo.

12. Listado de la herramienta de corte en cada ensayo. (figura 18).

Listado de la variación de parámetros en la herramienta.

Pizza-Tabla de Hts.

Número...	Nombre de tipo de Hts. definida por el usuario	Diámetro	Nº de filos	Tipo de...	Avance...	Unidad...	Giro-Ca...	Nombre de Porta...
1	Fresa Vertical	20 mm	4	Fz	0.1 mm	V	62.5	BT40 ER 32x60
2	Fresa Vertical	20 mm	4	Fz	0.1 mm	V	75	BT40 ER 32x60
3	Fresa Vertical	20 mm	4	Fz	0.1 mm	V	87.5	BT40 ER 32x60
4	Fresa Vertical	20 mm	4	Fz	0.1 mm	V	300	BT40 ER 32x60
5	Fresa Vertical	20 mm	4	Fz	0.2 mm	V	62.5	BT40 ER 32x60
6	Fresa Vertical	20 mm	4	Fz	0.2 mm	V	75	BT40 ER 32x60
7	Fresa Vertical	20 mm	4	Fz	0.2 mm	V	87.5	BT40 ER 32x60
8	Fresa Vertical	20 mm	4	Fz	0.2 mm	V	300	BT40 ER 32x60
9	Fresa Vertical	20 mm	4	Fz	0.3 mm	V	62.5	BT40 ER 32x60
10	Fresa Vertical	20 mm	4	Fz	0.3 mm	V	75	BT40 ER 32x60
11	Fresa Vertical	20 mm	4	Fz	0.3 mm	V	87.5	BT40 ER 32x60
12	Fresa Vertical	20 mm	4	Fz	0.3 mm	V	300	BT40 ER 32x60
13	Fresa Vertical	20 mm	4	Fz	0.4 mm	V	62.5	BT40 ER 32x60
14	Fresa Vertical	20 mm	4	Fz	0.4 mm	V	75	BT40 ER 32x60
15	Fresa Vertical	20 mm	4	Fz	0.4 mm	V	87.5	BT40 ER 32x60
16	Fresa Vertical	20 mm	4	Fz	0.4 mm	V	300	BT40 ER 32x60

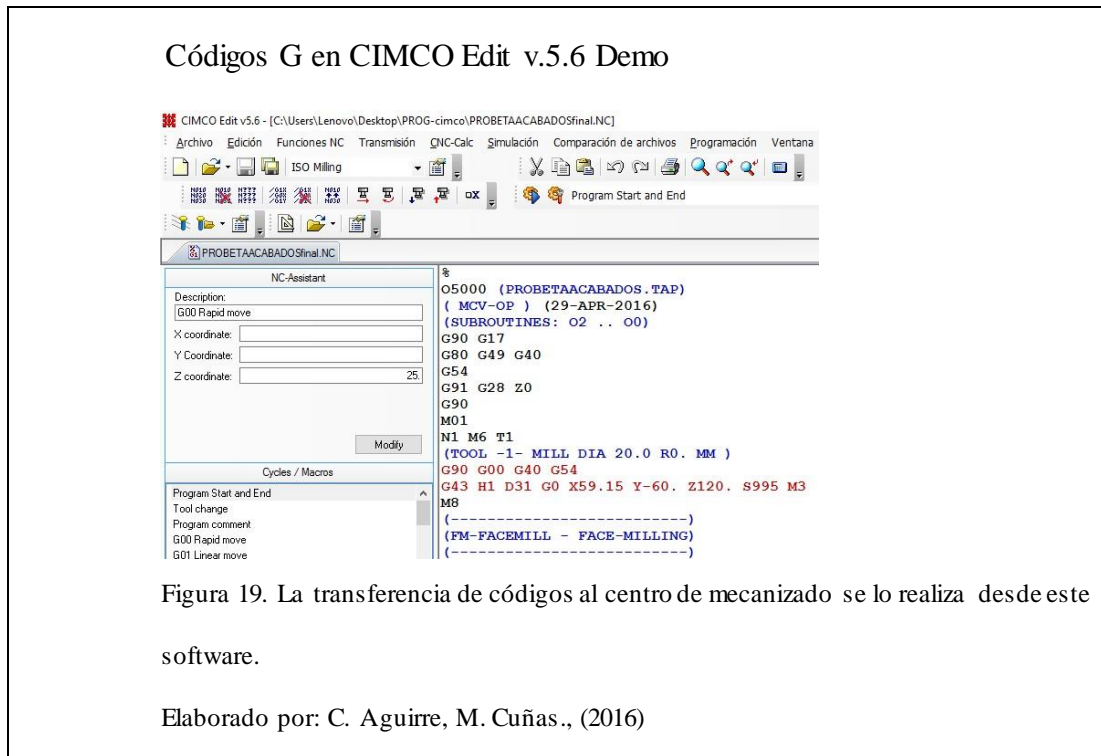
Figura 18. La lista de herramientas confirma los parámetros de variación.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Finalmente para concluir la programación, se procede a calcular y simular las tareas propuestas comprobando que no existan errores en el mecanizado los códigos obtenidos se presenta en el anexo 5.

### 13. Generar códigos G a través del Programa CIMCO Edit v5.6 Demo.

(Figura 19.)



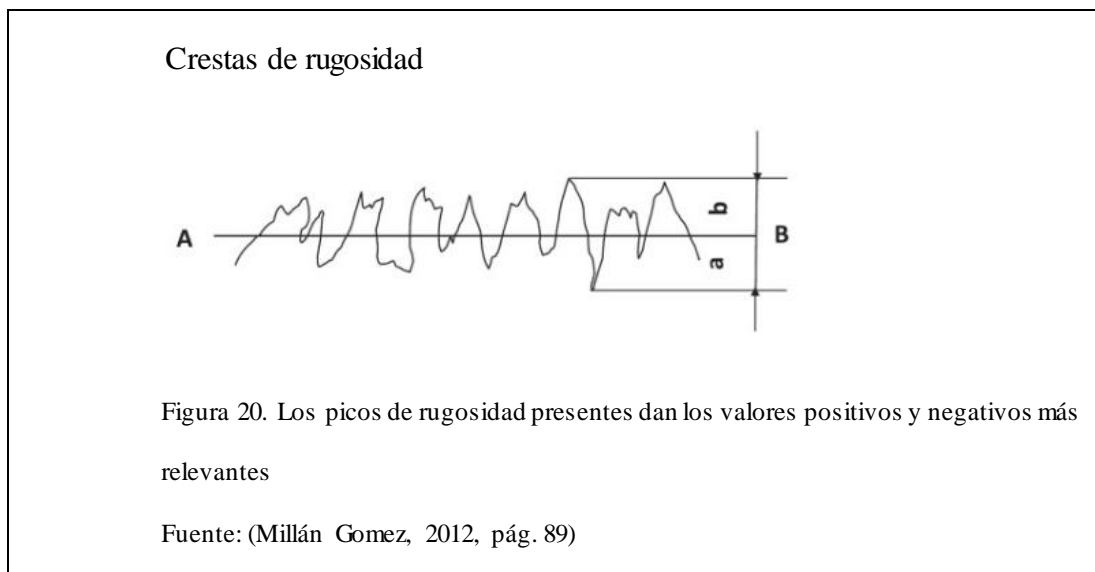
## 2.5 Medición de rugosidad en la superficie

De manera general todas las superficies poseen características superficiales conocidas como texturas, las cuales se han logrado identificar mediante lineamientos definidos y cuantitativos (Vega Morón, 2012, págs. 74,75).

En sí, la rugosidad es la oposición del rozamiento entre dos superficies a través de las crestas que estas presentan, por lo que dependen fundamentalmente del acabado superficial.

Debido al desprendimiento no uniforme del material por medio del arranque de viruta se puede obtener crestas positivas (letra b), si el material es en exceso y

crestas negativas (letra a), si se presenta falta de material, en la figura 20 se puede ver las crestas desde una línea imaginaria central AB (Millán Gomez, 2012, pág. 88).



La rugosidad superficial se describe mediante dos métodos:

- El método de la rugosidad media ( $R_a$ ) que se obtiene como resultado de una media aritmética de todas las crestas, considerando la sumatoria de los picos más altos y los picos más profundos sobre la cantidad de lecturas realizadas, la ecuación que describe este método está definida como:

$$R_a = \frac{a + b + c + d + \dots}{n} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

$a, b, c, d, \dots$  = valores absolutos

$n$  = cantidad de lecturas

- El método de la raíz del promedio de los cuadrados ( $R_q$ ) es el resultado de la raíz cuadrada de  $R_a$  y del cuadrado de los valores absolutos respecto de la línea media (Kalpakjian & Schmid, 2002, pág. 873).

Se define como:

$$Rq = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \dots}{n}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Además se considera apropiado constatar la medida de la altura de la cresta (Rz) la cual es el resultado de la media de la altura total.

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^N Hi}{n} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

Hi= la sumatoria del pico más alto y el pico más bajo

n = cantidad de lecturas

### **2.5.1 Tablas de rugosidad obtenidas tras el mecanizado con parámetros definidos y variables en el proceso de desbaste.**


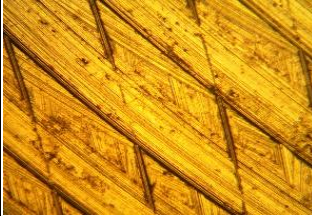
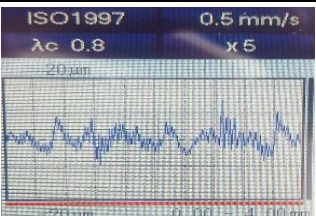
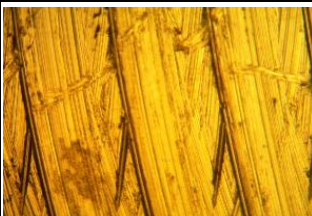
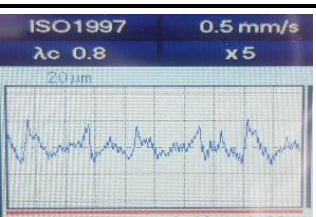

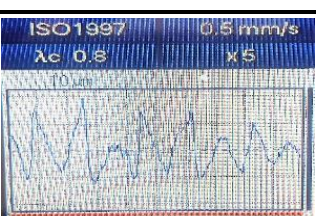

Los datos obtenidos con el rugosímetro Mitutoyo SJ210 fueron resultado del fresado a través del centro de mecanizado Leadwell V20i en base a los parámetros ilustrados en las Tablas 14,15, 16 y 17.

Donde los parámetros establecidos en el instrumento de medición son:

- Norma ISO 1997
- $\lambda_c = 0,8$  distancia de corte entre picos
- Velocidad de medición = 0,5 mm/s
- $\lambda_s = 2,5$  Factor seleccionado según  $\lambda_c$
- Ra: Valor de la rugosidad media aritmética en micras ( $\mu\text{m}$ )
- Rq: Valor de la rugosidad media cuadrática en micras ( $\mu\text{m}$ )
- Rz: Promedio de la profundidad de la rugosidad en micras ( $\mu\text{m}$ )

Tabla 18.

Medición de rugosidad de desbaste (profundidad 2 mm- fz 0.1)

REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD						
Profundidad de corte (mm)			DESABASTE			
fz (mm/ diente)			0.1			
Parametros de mecanizado			Resultados de rugosidad ( $\mu\text{m}$ )		Crestas de rugosidad	Visualización microscópica
Probeta Nº 1	Vc (m/min)	62.5	Ra	1.197		
	RPM	994.7	Rq	1.539		
	Av (mm/vuelta)	0.4	Rz	9.569		
	Am (mm/min)	397.9				
Probeta Nº 2	Vc (m/min)	75	Ra	3.225		
	RPM	1193.7	Rq	3.679		
	Av (mm/vuelta)	0.4	Rz	14.577		
	Am (mm/min)	477.5				
Probeta Nº 3	Vc (m/min)	87.5	Ra	2.959		
	RPM	1392.6	Rq	3.399		
	Av (mm/vuelta)	0.4	Rz	13.540		
	Am (mm/min)	557				
Probeta Nº 4	Vc (m/min)	100	Ra	2.476		
	RPM	1591.6	Rq	2.854		
	Av (mm/vuelta)	0.4	Rz	12.663		
	Am (mm/min)	636.6				

Nota: Se indica el registro de la rugosidad media, crestas de rugosidad y visualización microscópica con 2mm y fz 0.1 mm/diente.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Para la obtención adecuada de la mejor calidad superficial en cada registro se desarrolló el análisis de rugosidad media (Ra), mediante la variación de la velocidad de corte (Vc) como se muestra en la figura 21.



Gráfica de rugosidad del ensayo N° 1, fz=0.1



Figura 21. Relación de curvatura Velocidad de corte vs Rugosidad media

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

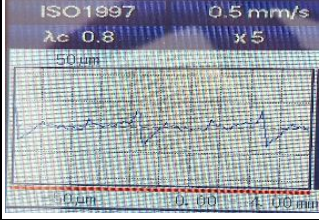

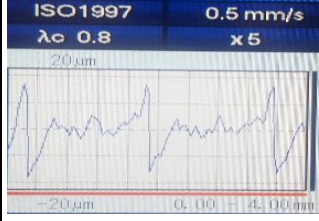

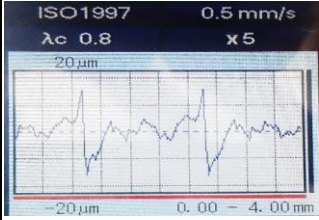

De los resultados mostrados se ha optado por seleccionar la probeta que presenta el menor valor medido en micras, el mismo que se consigue al ser mecanizado con una baja velocidad de corte de 62.5 m/min. (Probeta N° 1). De igual manera la visualización microscópica permite identificar la forma del desprendimiento de material provocado por la herramienta de corte al ser desplazada.

Tabla 19.

Medición de rugosidad de desbaste (profundidad 2 mm- fz 0.2)

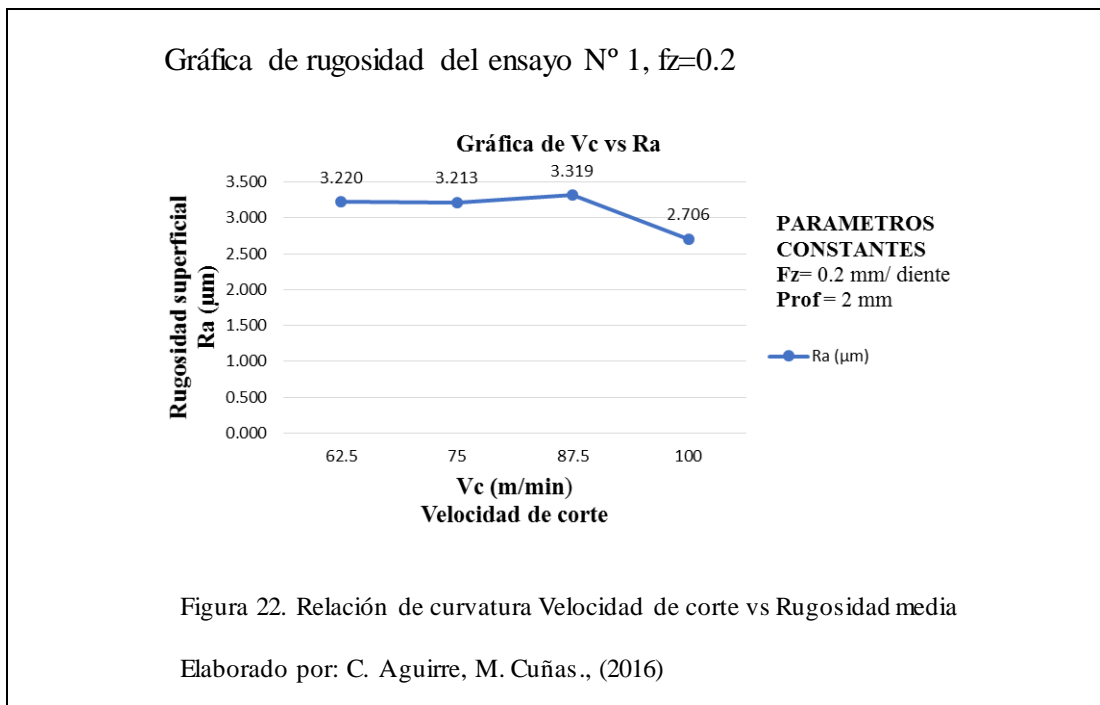
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Profundidad de corte (mm)			2	DESBASTE	
fz (mm/ diente)			0.2		
Parametros de mecanizado			Resultados de rugosidad (μm)	Crestas de rugosidad	Visualización microscópica
Probeta N° 1	Vc (m/min)	62.5	Ra	3.220	
	RPM	994.7	Rq	3.871	
	Av (mm/vuelta)	0.8			
	Am (mm/min)	795.8	Rz	19.577	



Probeta N° 2	Vc (m/min)	75	Ra	3.213		
	RPM	1193.7				
	Av (mm/vuelta)	0.8	Rq	3.888		
	Am (mm/min)	954.9		Rz	19.060	
Probeta N° 3	Vc (m/min)	87.5	Ra	3.319		
	RPM	1392.6				
	Av (mm/vuelta)	0.8	Rq	3.999		
	Am (mm/min)	1114.1		Rz	15.711	
Probeta N° 4	Vc (m/min)	100	Ra	2.706		
	RPM	1591.6				
	Av (mm/vuelta)	0.8	Rq	3.408		
	Am (mm/min)	1273.2		Rz	17.695	

Nota: Se indica el registro de la rugosidad media, crestas de rugosidad y visualización microscópica con profundidad de corte de 2mm y fz 0.2 mm/diente.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

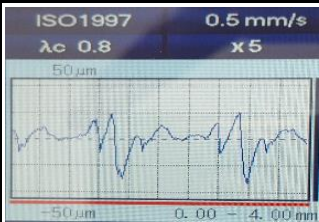

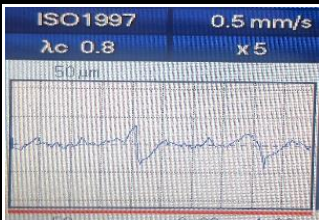

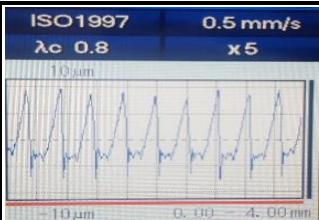

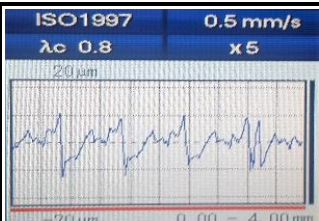
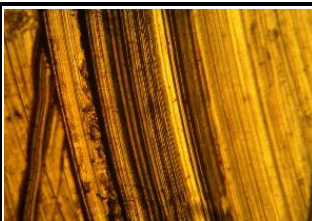


En la figura 22 el valor mínimo de rugosidad media pertenece al mecanizado realizado con la máxima velocidad de corte, es decir, de 100 m/min. (Probeta N° 4).

Como se puede visualizar a través del microscópico la forma de la superficie presenta una uniformidad en el desprendimiento del material y una mejor apariencia.

Tabla 20.

Medición de rugosidad de desbaste (profundidad 2 mm- fz 0.3)

REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD						
Profundidad de corte (mm)			2		DESBASTE	
fz (mm / diente)			0.3			
	Parametros de mecanizado		Resultados de rugosidad (μm)		Crestas de rugosidad	Visualización microscópica
Probeta Nº 1	Vc (m/min)	62.5	Ra	6.611		
	RPM	994.7	Rq	9.042		
	Av (mm/vuelta)	1.2				
	Am (mm/min)	1193.7	Rz	41.344		
Probeta Nº 2	Vc (m/min)	75	Ra	7.187		
	RPM	1193.7	Rq	9.329		
	Av (mm/vuelta)	1.2				
	Am (mm/min)	1432.4	Rz	39.011		
Probeta Nº 3	Vc (m/min)	87.5	Ra	6.911		
	RPM	1392.6	Rq	9.021		
	Av (mm/vuelta)	1.2				
	Am (mm/min)	1671.1	Rz	37.667		
Probeta Nº 4	Vc (m/min)	100	Ra	7.623		
	RPM	1591.6	Rq	9.448		
	Av (mm/vuelta)	1.2				
	Am (mm/min)	1909.9	Rz	38.426		

Nota: Se indica el registro de la rugosidad media, crestas de rugosidad y visualización microscópica con profundidad de corte de 2mm y fz 0.3mm/diente.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Gráfica de rugosidad del ensayo N° 1, fz=0.3

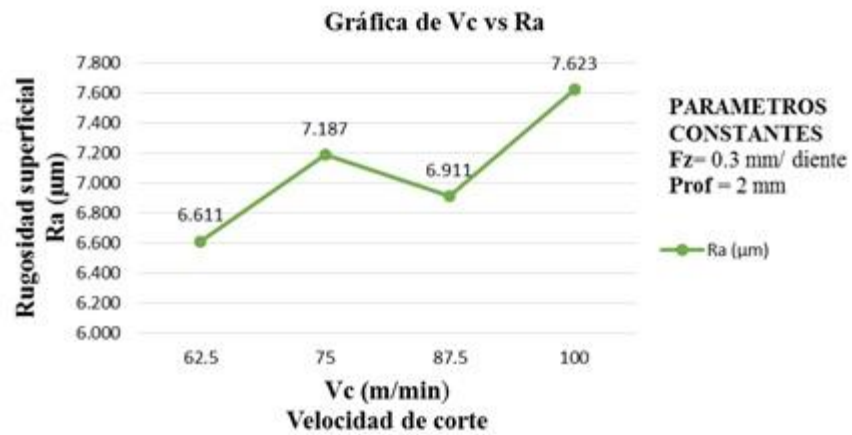


Figura 23. Relación de curvatura Velocidad de corte vs Rugosidad media

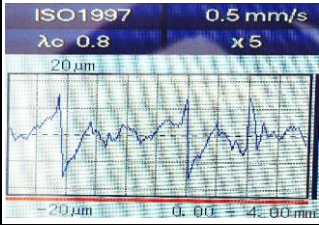
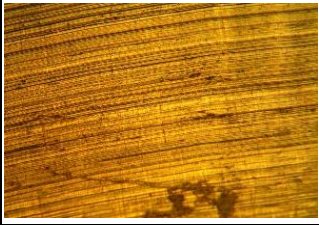




Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

En la figura 23 el valor mínimo de rugosidad media pertenece al mecanizado realizado con la mínima velocidad de corte, es decir, de 62.5 m/min. (Probeta N° 1). La visualización microscópica de la forma de la superficie presenta agrietamientos debido al desprendimiento brusco del material, sin embargo la medición que registra el rugosímetro es mínima en comparación a las demás probetas de este ensayo.

Tabla 21.

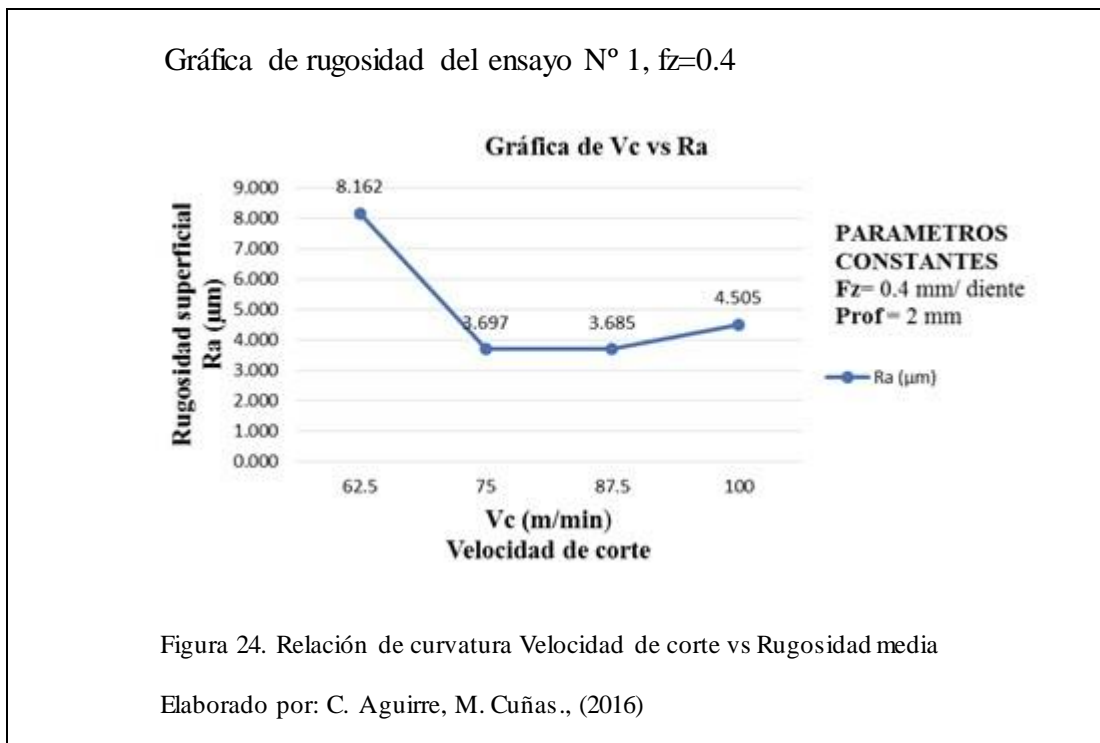
Medición de rugosidad de desbaste (profundidad 2 mm- fz 0.4)

REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Profundidad de corte (mm)		2			
fz (mm/ diente)		0.4			
Parametros de mecanizado		Resultados de rugosidad (µm)		Crestas de rugosidad	Visualización microscópica
Probeta N° 1	Vc (m/min)	62.5	Ra	8.162	
	RPM	994.7	Rq	10.778	
	Av (mm/vuelta)	1.6	Rz	46.663	
	Am (mm/min)	1591.6			

Probeta N° 2	Vc (m/min)	75	Ra	3.697		
	RPM	1193.7	Rq	4.964		
	Av (mm/vuelta)	1.6				
	Am (mm/min)	1909.9	Rz	22.528		
Probeta N° 3	Vc (m/min)	87.5	Ra	3.685		
	RPM	1392.6	Rq	5.087		
	Av (mm/vuelta)	1.6				
	Am (mm/min)	2228.2	Rz	22.115		
Probeta N° 4	Vc (m/min)	100	Ra	4.505		
	RPM	1591.6	Rq	5.639		
	Av (mm/vuelta)	1.6				
	Am (mm/min)	2546.5	Rz	24.236		

Nota: Se indica el registro de la rugosidad media, crestas de rugosidad y visualización microscópica con profundidad de corte de 2mm y fz 0.4 mm/diente.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)



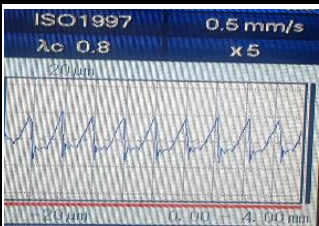
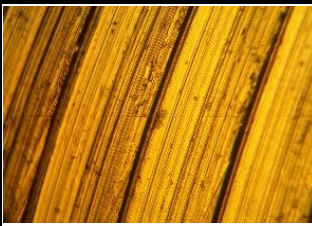
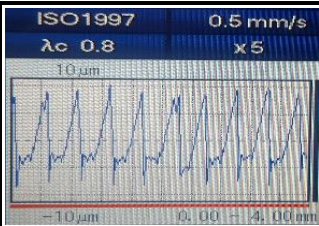
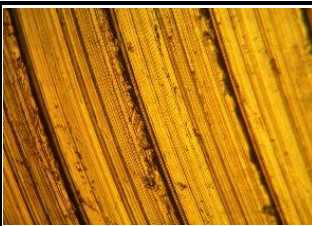
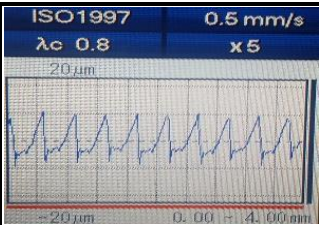
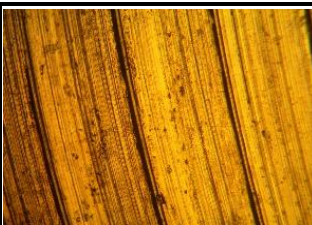
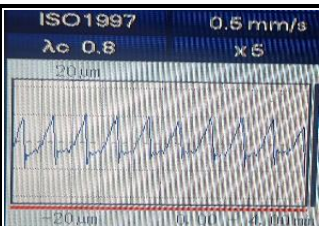
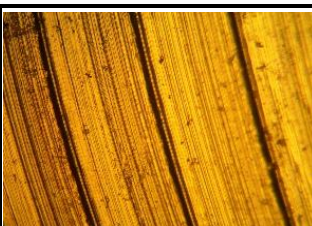
En la figura 24 el valor mínimo de rugosidad media pertenece al mecanizado realizado con una velocidad de corte intermedia, es decir, de 87.5 m/min. (Probeta N°



3), no mostrando mayor diferencia en comparación con la rugosidad obtenida mediante la velocidad de 75 m/min. Se visualizará a través del microscópico las formas de las superficies en la probeta 2 y 3 son muy similares al presentar una buena apariencia.

Tabla 22.

Medición de rugosidad de desbaste (profundidad 4 mm- fz 0.1)

REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD						
Profundidad de corte (mm)		4		DESBASTE		
fz (mm / diente)		0.1				
	Parametros de mecanizado		Resultados de rugosidad (µm)		Crestas de rugosidad	Visualización microscópica
Probeta Nº 1	Vc (m/min)	62.5	Ra	3.521		
	RPM	994.7	Rq	4.098		
	Av (mm/vuelta)	0.4				
	Am (mm/min)	397.9	Rz	16.659		
Probeta Nº 2	Vc (m/min)	75	Ra	3.999		
	RPM	1193.7	Rq	4.529		
	Av (mm/vuelta)	0.4				
	Am (mm/min)	477.5	Rz	17.709		
Probeta Nº 3	Vc (m/min)	87.5	Ra	3.995		
	RPM	1392.6	Rq	4.582		
	Av (mm/vuelta)	0.4				
	Am (mm/min)	557	Rz	18.363		
Probeta Nº 4	Vc (m/min)	100	Ra	4.016		
	RPM	1591.6	Rq	4.576		
	Av (mm/vuelta)	0.4				
	Am (mm/min)	636.6	Rz	18.425		

Nota: Se indica el registro de la rugosidad media, crestas de rugosidad y visualización microscópica con profundidad de corte de 4 mm y fz 0.1mm/diente.

Elaborado por: C. Aguirre, M Cuñas., (2016)

Gráfica de rugosidad del ensayo N° 2, fz=0.1

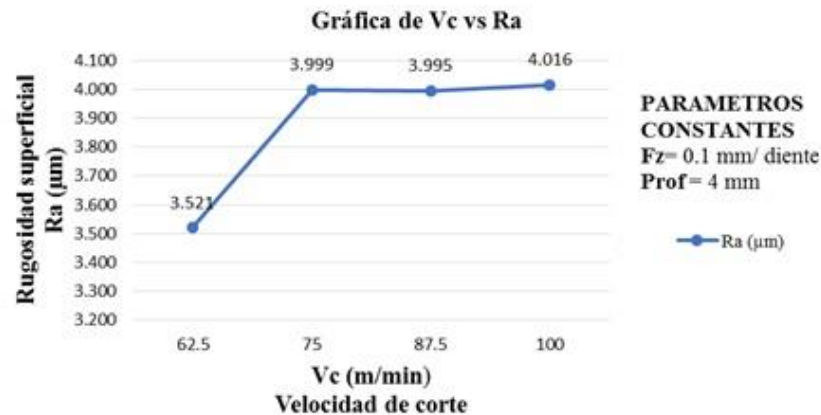


Figura 25. Relación de curvatura Velocidad de corte vs Rugosidad media


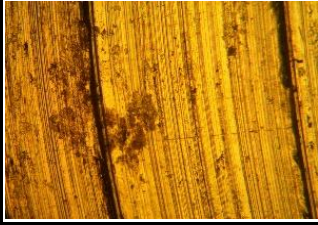
Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

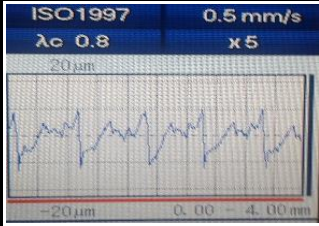
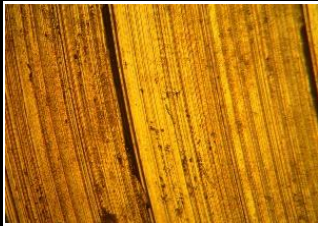
En la figura 25 el valor mínimo de rugosidad media pertenece al mecanizado realizado con una baja velocidad de corte correspondiente a 62.5 m/min. (Probeta N° 1), se visualizará a través del microscopio la trayectoria de desplazamiento dejada por la herramienta al mecanizar una profundidad de 4 mm, siendo esta mucho más uniforme en comparación a las demás, sin notar el desprendimiento brusco del material.

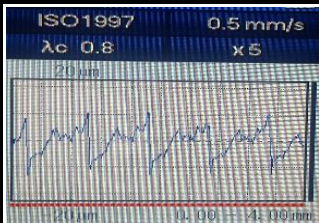
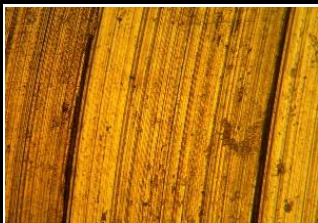
Tabla 23.

Medición de rugosidad de desbaste (profundidad 4 mm – fz 0.2)

REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Profundidad de corte (mm)		4	DESBASTE		
fz (mm/ diente)		0.2			
Parametros de mecanizado		Resultados de rugosidad (μm)		Crestas de rugosidad	Visualización microscópica
Probeta N° 1	Vc (m/min)	62.5	Ra	3.355	
	RPM	994.7	Rq	4.147	
	Av (mm/vuelta)	0.8	Rz	20.715	
	Am (mm/min)	795.8			

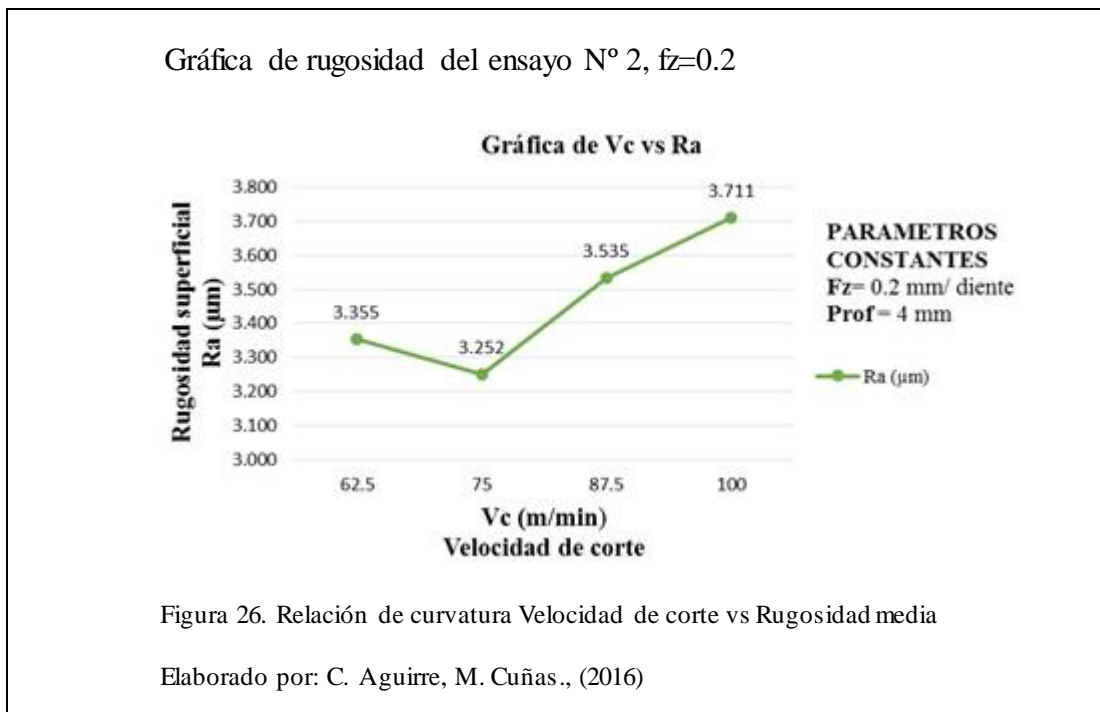
Probeta Nº 2	Vc (m/min)	75	Ra	3.252				
	RPM	1193.7	Rq	4.059				
	Av (mm/vuelta)	0.8						
	Am (mm/min)	954.9					Rz	20.412

Probeta Nº 3	Vc (m/min)	87.5	Ra	3.535				
	RPM	1392.6	Rq	4.398				
	Av (mm/vuelta)	0.8						
	Am (mm/min)	1114.1					Rz	21.187

Probeta Nº 4	Vc (m/min)	100	Ra	3.711				
	RPM	1591.6	Rq	4.529				
	Av (mm/vuelta)	0.8						
	Am (mm/min)	1273.2					Rz	21.381

Nota: Se indica el registro de la rugosidad media, crestas de rugosidad y visualización microscópica con 4 mm y fz 0.2 mm/diente.

Elaborado por: C. Aguirre C, M. Cuñas., (2016)




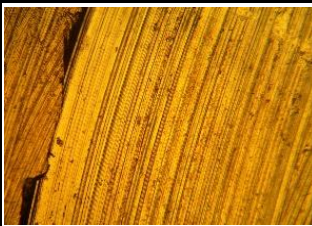

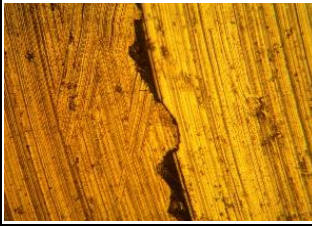
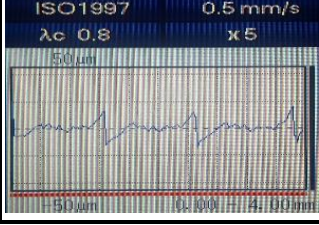
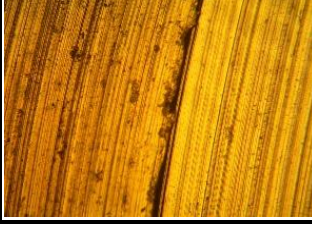
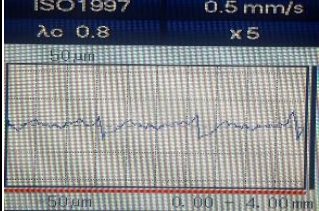

En la figura 26 el valor mínimo de rugosidad media pertenece al mecanizado realizado con una velocidad de corte intermedia, es decir, de 75 m/min. (Probeta N°



2), se visualizará a través del microscópico que las forma de la superficie en la probeta presenta un agrietamiento en menor cantidad respecto a las otras, esto sucede debido a la fuerza de desplazamiento que ejerce la herramienta al mecanizar 4 mm de espesor.

Tabla 24.

Medición de rugosidad de desbaste (profundidad 4 mm – fz 0.3)

REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD							
Profundidad de corte (mm)		4		DESBASTE			
f z (mm / diente)		0.3					
	Parametros de mecanizado		Resultados de rugosidad (μm)		Crestas de rugosidad	Visualización microscópica	
Probeta Nº 1	Vc (m/min)	62.5	Ra	3.458			
	RPM	994.7	Rq	4.662			
	Av (mm/vuelta)	1.2					
	Am (mm/min)	1193.7	Rz	21.602			
Probeta Nº 2	Vc (m/min)	75	Ra	3.888			
	RPM	1193.7	Rq	5.276			
	Av (mm/vuelta)	1.2					
	Am (mm/min)	1432.4	Rz	23.541			
Probeta Nº 3	Vc (m/min)	87.5	Ra	4.056			
	RPM	1392.6	Rq	5.721			
	Av (mm/vuelta)	1.2					
	Am (mm/min)	1671.1	Rz	28.606			
Probeta Nº 4	Vc (m/min)	100	Ra	3.067			
	RPM	1591.6	Rq	4.121			
	Av (mm/vuelta)	1.2					
	Am (mm/min)	1909.9	Rz	21.712			

Nota: Se indica el registro de la rugosidad media, crestas de rugosidad y visualización microscópica con profundidad de corte de 4 mm y fz 0.3 mm/diente.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)



Gráfica de rugosidad del ensayo N° 2,  $f_z=0.3$

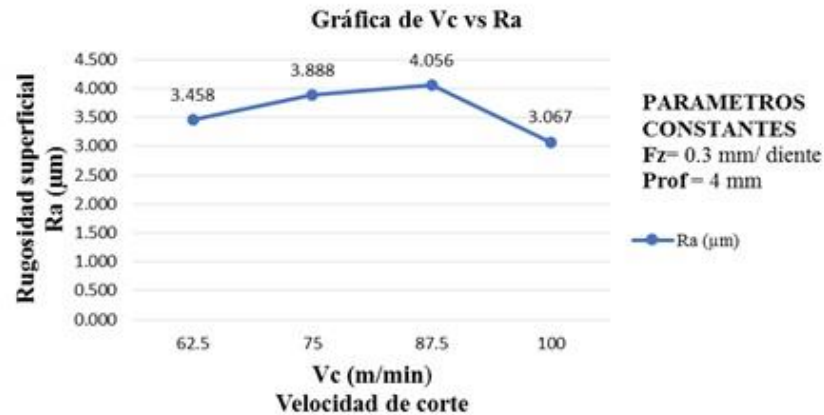


Figura 27. Relación de curvatura Velocidad de corte vs Rugosidad media

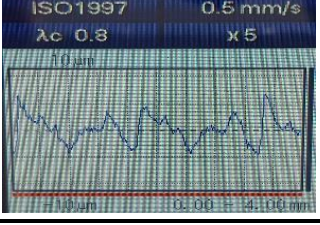

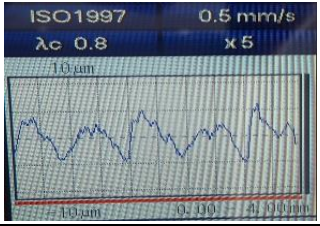


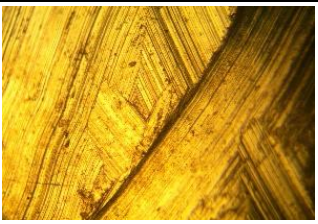
Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

En la figura 27 el valor mínimo de rugosidad media pertenece al mecanizado realizado con la máxima velocidad de corte, es decir, de 100 m/min. (Probeta N° 4). Sin embargo como se puede visualizar a través del microscópico la forma de la superficie presenta agrietamientos debido a la fricción causada en el desprendimiento del material de manera brusca.

Tabla 25.

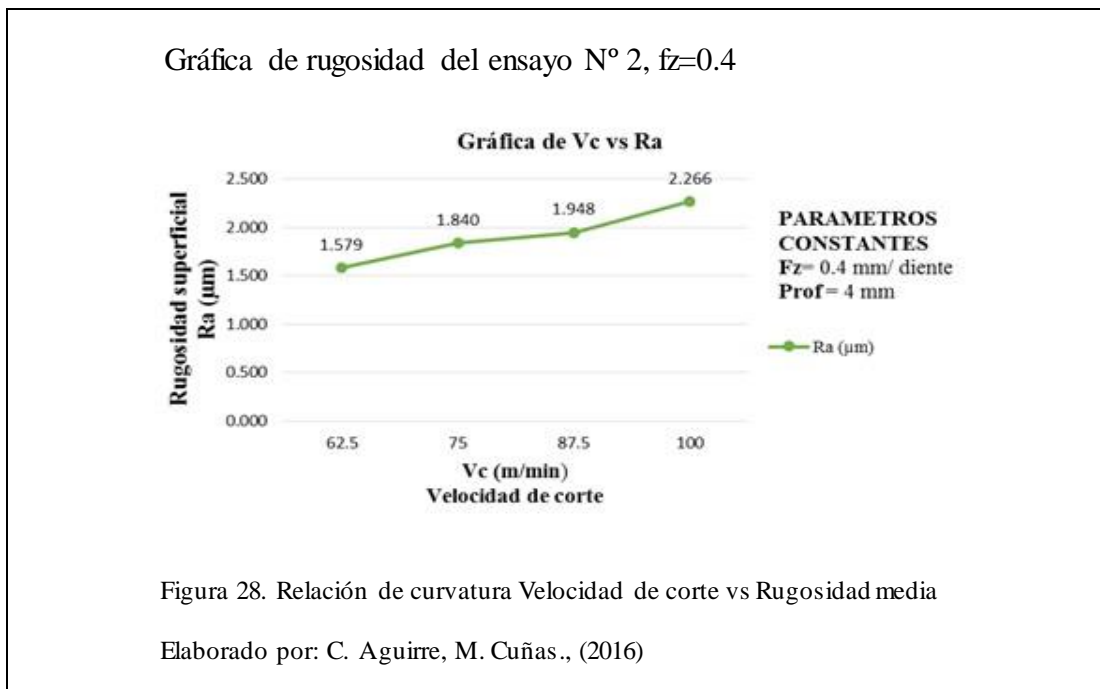
Medición de rugosidad de desbaste (profundidad 4 mm –  $f_z$  0.4)

REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Profundidad de corte (mm)			4	DESBASTE	
$f_z$ (mm / diente)			0.4		
Parametros de mecanizado		Resultados de rugosidad (µm)		Crestas de rugosidad	Visualización microscópica
Probeta N° 1	Vc (m/min)	62.5	Ra	1.579	
	RPM	994.7	Rq	1.959	
	Av (mm/vuelta)	1.6	Rz	7.459	
	Am (mm/min)	1591.6			

Probeta N° 2	Vc (m/min)	75	Ra	1.840		
	RPM	1193.7	Rq	2.302		
	Av (mm/vuelta)	1.6		9.072		
	Am (mm/min)	1909.9				
Probeta N° 3	Vc (m/min)	87.5	Ra	1.948		
	RPM	1392.6	Rq	2.336		
	Av (mm/vuelta)	1.6		8.470		
	Am (mm/min)	2228.2				
Probeta N° 4	Vc (m/min)	100	Ra	2.266		
	RPM	1591.6	Rq	2.825		
	Av (mm/vuelta)	1.6		10.852		
	Am (mm/min)	2546.5				

Nota: Se indica el registro de la rugosidad media, crestas de rugosidad y visualización microscópica con profundidad de corte de 4 mm y fz 0.4 mm/diente.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)



En la figura 28 el valor mínimo de rugosidad media pertenece al mecanizado realizado con una baja velocidad de corte correspondiente a 62.5 m/min (Probeta N°

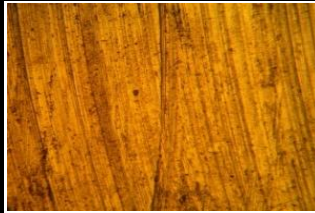


1), se visualizará a través del microscópico la forma de la superficie presenta una uniformidad en el desprendimiento del material y una mejor apariencia.


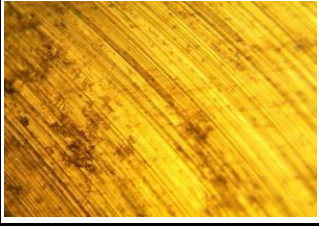
De manera general en los procesos de desbaste de 2 mm y 4 mm se determinó que el tipo de acabado varía en base al aumento de velocidad de corte y de avance, el cual determina que conforme la velocidad aumenta forma secciones más gruesas en la superficie de desprendimiento del material debido a la fricción provocada por la herramienta de cortante. De igual manera un factor importante es la profundidad de corte ya que al tratarse del mismo procedimiento con las mismas variaciones, se obtiene valores distintos de rugosidad.

## 2.5.2 Tablas de rugosidad obtenidas tras el mecanizado con parámetros definidos y variables en el proceso de acabado.

Tabla 26.

Medición de rugosidad de acabado (profundidad 1 mm – fz 0.05)

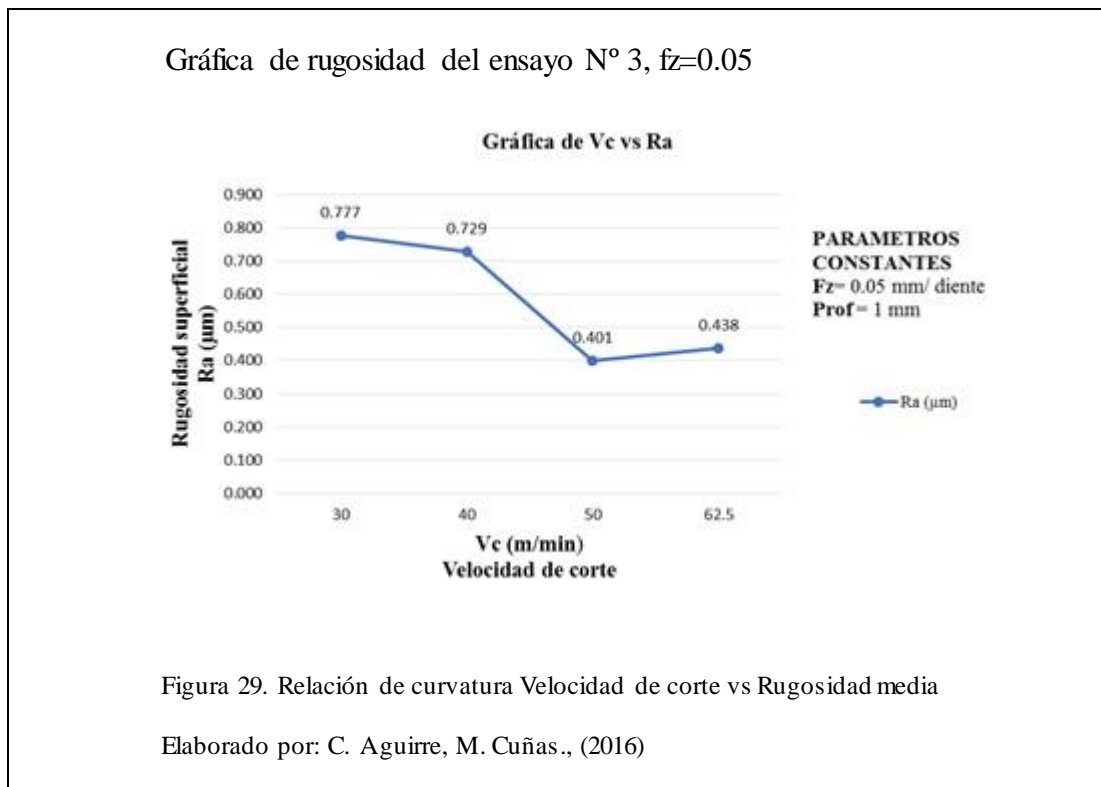
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD						
Profundidad de corte (mm)				1		
f z (mm / diente)				0.05		
Parametros de mecanizado				Resultados de rugosidad (μm)		ACABADO
				Crestas de rugosidad		Visualización microscópica
Probeta Nº 1	Vc (m/min)	30	Ra	0.777		
	RPM	477.5	Rq	0.941		
	Av (mm/vuelta)	0.2				
	Am (mm/min)	95.5	Rz	4.307		
Probeta Nº 2	Vc (m/min)	40	Ra	0.729		
	RPM	636.6	Rq	0.881		
	Av (mm/vuelta)	0.2				
	Am (mm/min)	127.3	Rz	3.835		
Probeta Nº 3	Vc (m/min)	50	Ra	0.401		
	RPM	795.8	Rq	0.494		
	Av (mm/vuelta)	0.2				
	Am (mm/min)	159.2	Rz	2.262		

Probeta N° 4	Vc (m/min)	62.5	Ra	0.438		
	RPM	994.7	Rq	0.53		
	Av (mm/vuelta)	0.2				
	Am (mm/min)	198.9	Rz	2.661		

Nota: Se indica el registro de la rugosidad media, crestas de rugosidad y visualización microscópica en el mecanizado de acabado con profundidad de corte de 1 mm y fz 0.05 mm/diente.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

En el ensayo N° 3 hemos considerado los datos tanto de velocidad de corte Vc como de rugosidad media Ra, donde se ha podido comprobar la existencia de una rugosidad inferior como se puede identificar en la figura 29.





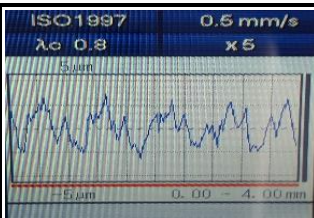



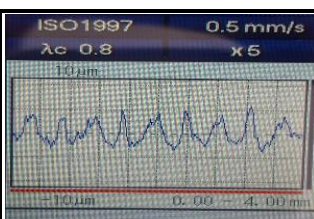
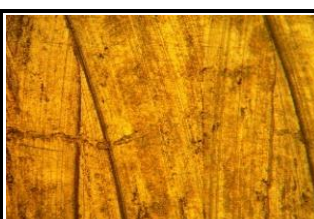
En la Figura 29 se puede identificar que la alternativa más adecuada será la probeta N° 3 con acabado superficial mejorado debido a la menor rugosidad media de 0.401 µm con un 1 mm de profundidad con una velocidad de corte de 50 m/min, la



visualización microscópica muestra un desprendimiento de material más uniforme que las demás.

Tabla 27.

Medición de rugosidad de acabado (profundidad 1 mm – fz 0.2)

REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD						
Profundidad de corte (mm)		1		ACABADO		
f z (mm / diente)		0.2				
Parametros de mecanizado			Resultados de rugosidad (µm)		Crestas de rugosidad	Visualización microscópica
Probeta Nº 1	Vc (m/min)	30	Ra	1.246		
	RPM	477.5	Rq	1.491		
	Av (mm/vuelta)	0.8				
	Am (mm/min)	382.0				
Probeta Nº 2	Vc (m/min)	40	Ra	1.277		
	RPM	636.6	Rq	1.499		
	Av (mm/vuelta)	0.8				
	Am (mm/min)	509.3				
Probeta Nº 3	Vc (m/min)	50	Ra	1.351		
	RPM	795.8	Rq	1.554		
	Av (mm/vuelta)	0.8				
	Am (mm/min)	636.6				
Probeta Nº 4	Vc (m/min)	62.5	Ra	1.774		
	RPM	994.7	Rq	2.086		
	Av (mm/vuelta)	0.8				
	Am (mm/min)	795.8				

Nota: Se indica el registro de la rugosidad media, crestas de rugosidad y visualización microscópica en el mecanizado de acabado con profundidad de corte de 1 mm y fz 0.2 mm/diente.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Gráfica de rugosidad del ensayo N° 3, fz=0.2



Figura 30. Relación de curvatura Velocidad de corte vs Rugosidad media



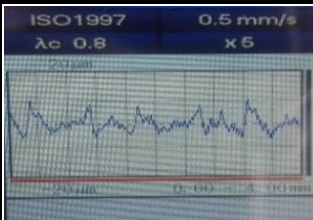


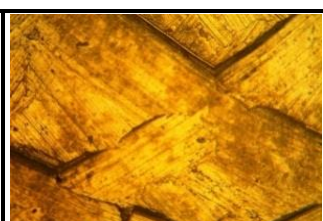
Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

En la Figura 30 se observa que la probeta N° 1 con una Vc de 30 m/min y una rugosidad media de 1.246 µm es la alternativa más idónea para el mecanizado, además se puede identificar un acabado superficial mejorado respecto a las probetas 2, 3 y 4 en la cuales se identifica un deterioro del material por el desprendimiento brusco y a la vez la formación de fisuras en la superficie.

Tabla 28.

Medición de rugosidades de acabado (profundidad 1 mm – fz 0.35)

REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Profundidad de corte (mm)			1	ACABADO	
fz (mm/diente)			0.35		
Parametros de mecanizado		Resultados de rugosidad (µm)		Crestas de rugosidad	Visualización microscópica
Probeta N° 1	Vc (m/min)	30	Ra	1.668	
	RPM	477.5	Rq	2.059	
	Av (mm/vuelta)	1.4			
	Am (mm/min)	668.4	Rz	9.311	
					

Probeta Nº 2	Vc (m/min)	40	Ra	1.765				
	RPM	636.6	Rq	2.146				
	Av (mm/vuelta)	1.4						
	Am (mm/min)	891.3						
Probeta Nº 3	Vc (m/min)	50	Ra	2.355				
	RPM	795.8	Rq	2.967				
	Av (mm/vuelta)	1.4						
	Am (mm/min)	1114.1						
Probeta Nº 4	Vc (m/min)	62.5	Ra	2.397				
	RPM	994.7	Rq	3.028				
	Av (mm/vuelta)	1.4						
	Am (mm/min)	1392.6						
			Rz	8.916				

Nota: Se indica el registro de la rugosidad media, crestas de rugosidad y visualización microscópica en el mecanizado de acabado con profundidad de corte de 1 mm y fz 0.35 mm/diente.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Gráfica de rugosidad del ensayo N° 3, fz=0.35

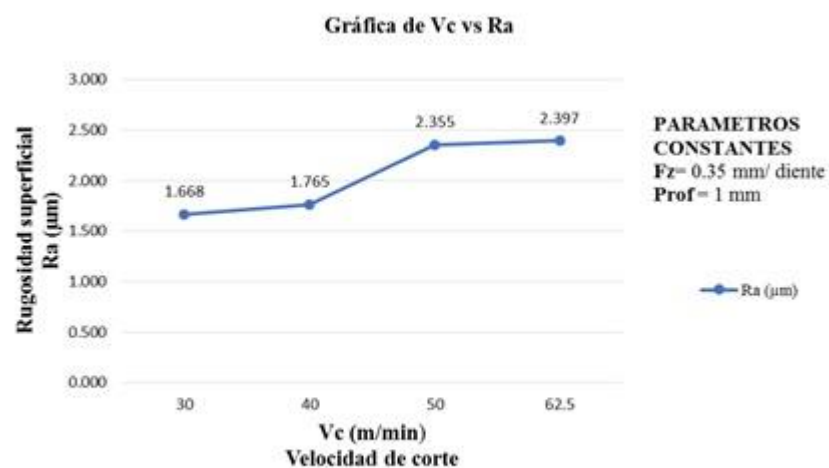


Figura 31. Relación de curvatura Velocidad de corte vs Rugosidad media

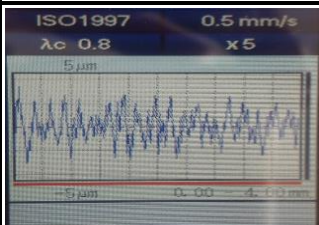
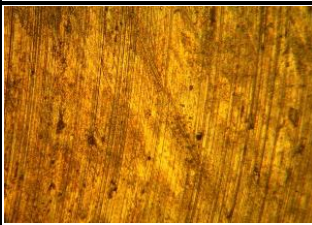
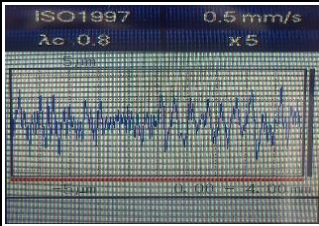
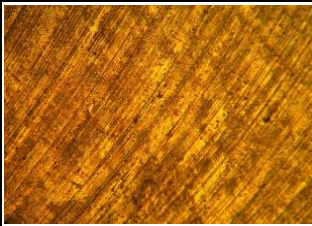
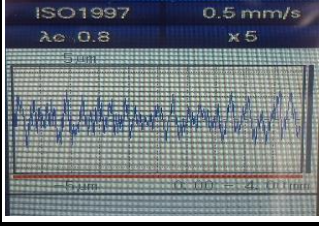
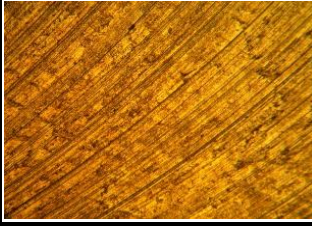
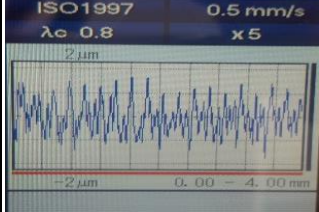

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)



En la Figura 31 se observa que la probeta N° 1 con una Vc de 30 m/min y una rugosidad media de 1.668  $\mu\text{m}$  resultara la más eficiente respecto a las demás probetas donde estas siguen presentando deterioro al momento del desprendimiento del material pero esta vez no presenta fisuras en su superficie como se identifica en la Tabla 28. (Probetas 2,3 y 4).

Tabla 29.

Medición de rugosidades de acabado (profundidad 0.2 mm – fz 0.05)

REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD									
Profundidad de corte (mm)					0.2		ACABADO		
f z (mm / diente)					0.05				
		Parametros de mecanizado		Resultados de rugosidad (μm)		Crestas de rugosidad		Visualización microscópica	
Probeta Nº 1	Vc (m/min)	30	Ra	1.111					
	RPM	477.5	Rq	1.362					
	Av (mm/vuelta)	0.2	Rz	6.564					
	Am (mm/min)	95.5							
Probeta Nº 2	Vc (m/min)	40	Ra	1.011					
	RPM	636.6	Rq	1.277					
	Av (mm/vuelta)	0.2	Rz	6.261					
	Am (mm/min)	127.3							
Probeta Nº 3	Vc (m/min)	50	Ra	0.903					
	RPM	795.8	Rq	1.103					
	Av (mm/vuelta)	0.2	Rz	5.459					
	Am (mm/min)	159.2							
Probeta Nº 4	Vc (m/min)	62.5	Ra	0.528					
	RPM	994.7	Rq	0.644					
	Av (mm/vuelta)	0.2	Rz	2.913					
	Am (mm/min)	198.9							

Nota: Se indica el registro de la rugosidad media, crestas de rugosidad y visualización microscópica en el mecanizado de acabado con profundidad de corte de 0.2 mm y fz 0.05 mm/diente.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)



Gráfica de rugosidad del ensayo N° 3,  $f_z=0.05$



Figura 32. Relación de curvatura Velocidad de corte vs Rugosidad media

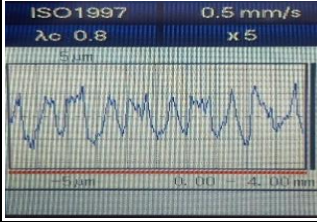
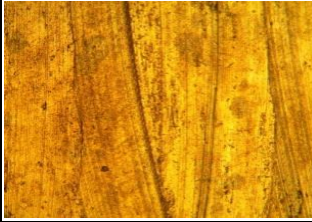
Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)


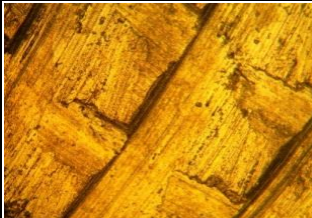
En la representación gráfica de la Figura 32 se observa que la probeta N° 4 con una Vc de 62.5 m/min y una rugosidad media de 0.528  $\mu\text{m}$  será la opción más viable para estipular una superficie más regular en su forma de mecanizado respecto a las otras tres opciones mencionadas en la Tabla 29.

Tabla 30.

Medición de rugosidades de acabado (profundidad 0.2 mm –  $f_z$  0.2)

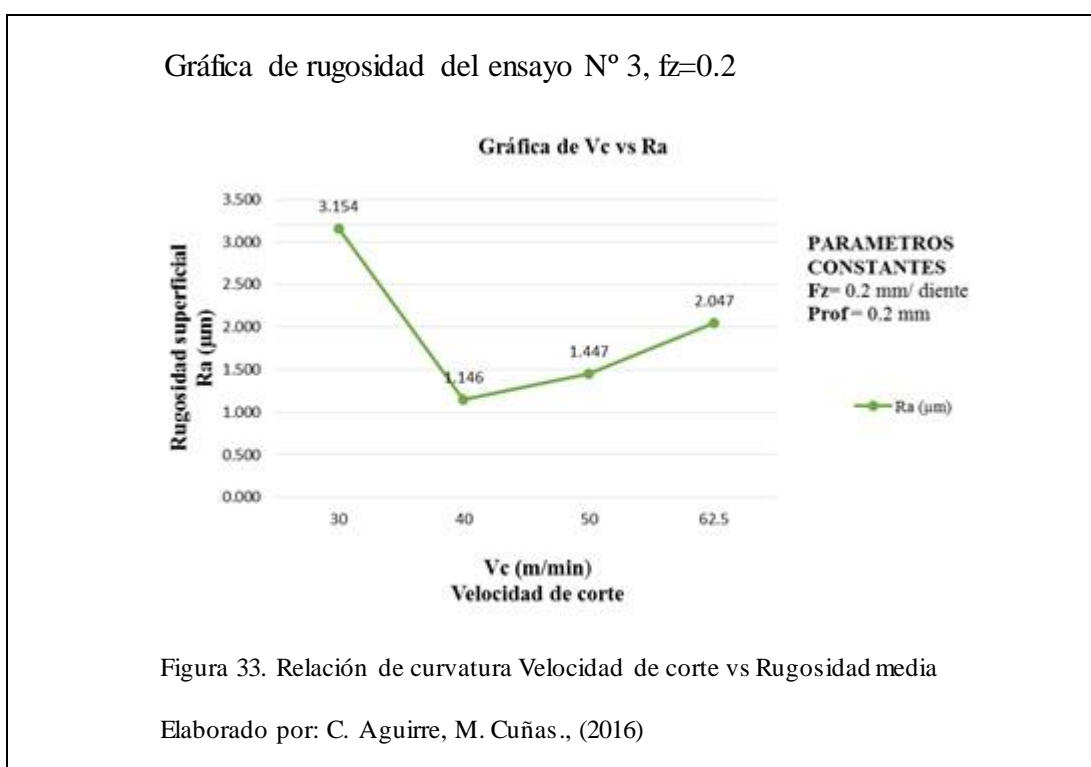
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD						
Profundidad de corte (mm)			0.2	ACABADO		
$f_z$ (mm/diente)			0.2			
Parametros de mecanizado			Resultados de rugosidad ( $\mu\text{m}$ )	Crestas de rugosidad	Visualización microscópica	
Probeta N° 1	Vc (m/min)	30	Ra	3.154		
	RPM	477.5	Rq	3.543		
	Av (mm/vuelta)	0.8	Rz	13.076		
	Am (mm/min)	382				
Probeta N° 2	Vc (m/min)	40	Ra	1.146		
	RPM	636.6	Rq	1.373		
	Av (mm/vuelta)	0.8	Rz	5.174		
	Am (mm/min)	509.3				

Probeta Nº 3	Vc (m/min)	50	Ra	1.447		
	RPM	795.8	Rq	1.632		
	Av (mm/vuelta)	0.8				
	Am (mm/min)	636.6				

Probeta Nº 4	Vc (m/min)	62.5	Ra	2.047		
	RPM	994.7	Rq	2.289		
	Av (mm/vuelta)	0.8				
	Am (mm/min)	795.8				

Nota: Se indica el registro de la rugosidad media, crestas de rugosidad y visualización microscópica en el mecanizado de acabado con profundidad de corte de 0.2 mm y fz 0.2 mm/diente.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

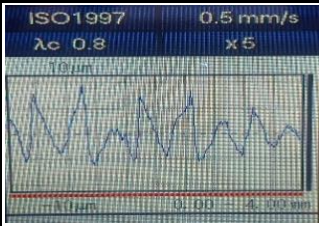
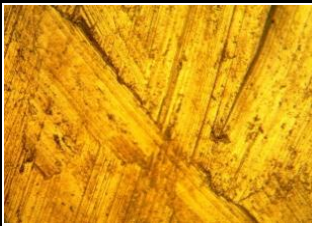
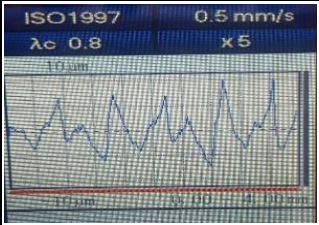
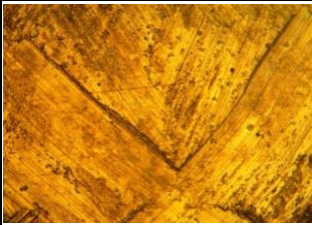


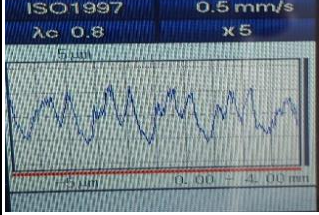



En la figura 33 se ha podido determinar que la probeta N° 2 es la alternativa mínima en rugosidad media con 1.146  $\mu\text{m}$  y una velocidad de corte de 40 m/min la cual presenta una superficie uniforme como se la puede identificar en la Tabla 30 en la sección de visualización microscópica respecto las demás probetas las cuales

muestran fisuras y líneas marcadas por el desprendimiento de material con la herramienta de corte.

Tabla 31.

Medición de rugosidades de acabado (profundidad 0.2 mm – fz 0.35)

REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD									
Profundidad de corte (mm)				0.2		ACABADO			
f z (mm / diente)				0.4					
		Parametros de mecanizado		Resultados de rugosidad (μm)		Crestas de rugosidad		Visualización microscópica	
Probeta Nº 1	Vc (m/min)	30	Ra	2.742					
	RPM	477.5	Rq	3.284					
	Av (mm/vuelta)	1.4							
	Am (mm/min)	668.4							Rz
Probeta Nº 2	Vc (m/min)	40	Ra	2.558					
	RPM	636.6	Rq	3.197					
	Av (mm/vuelta)	1.4							
	Am (mm/min)	891.3							Rz
Probeta Nº 3	Vc (m/min)	50	Ra	1.667					
	RPM	795.8	Rq	2.028					
	Av (mm/vuelta)	1.4							
	Am (mm/min)	1114.1							Rz
Probeta Nº 4	Vc (m/min)	62.5	Ra	2.001					
	RPM	994.7	Rq	2.482					
	Av (mm/vuelta)	1.4							
	Am (mm/min)	1392.6							Rz

Nota: Se indica el registro de la rugosidad media, crestas de rugosidad y visualización microscópica en el mecanizado de acabado con profundidad de corte de 0.2 mm y fz 0.4 mm/diente.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Gráfica de rugosidad del ensayo N° 3,  $f_z=0.35$

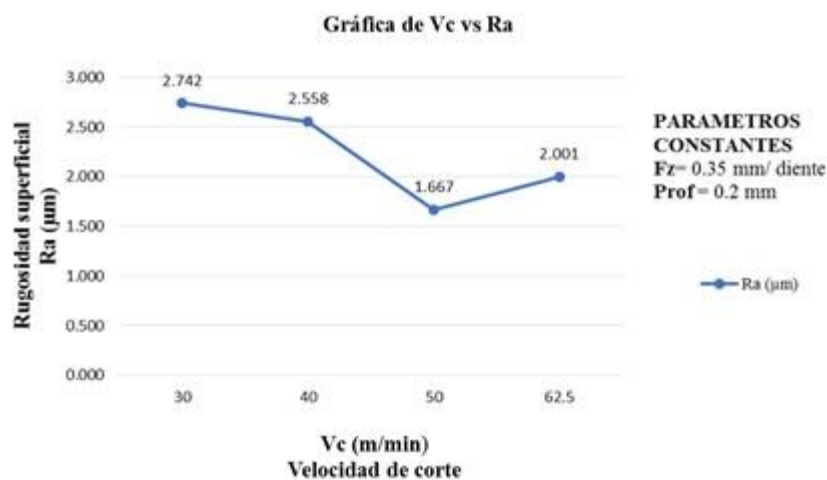


Figura 34. Relación de curvatura Velocidad de corte vs Rugosidad media

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

En la figura 34 se simboliza que la opción más recomendable para un acabado superior es la probeta N° 3 con su Vc de 50 m/min y su Ra 1.667 respecto a las otras probetas, según la observación microscópica definida con menos fisuras por el mecanizado realizado con otras velocidades de corte, pero tomando en cuenta que esta ha incrementado su Ra a diferencia de las anteriores probetas en las tablas 29 y 30.

Por otro lado se determinó que en el mecanizado de acabado, las secciones granulares que se forman por medio del desbaste de cada hélice se va disminuyendo conforme la velocidad aumenta y el avance de la herramienta es más detenido lo cual provoca que dichas secciones sean más cortas las cuales forman una apariencia más estética y a su vez ranuras menos notorias tras el desprendimiento de material de la probeta.

## Capítulo 3

### 3 Análisis de resultados

De los registros obtenidos en el capítulo anterior se seleccionó los valores más apropiados en cada proceso de desbaste de acuerdo a la profundidad y avance por diente, los mismos que influyen notoriamente en el mecanizado del material.

#### 3.1 Análisis de desbaste con profundidad de 2 mm

Las rugosidades descritas a continuación en la tabla 32 pertenecen a los valores mínimos registrados por el rugosímetro en las probetas.

Tabla 32.

Resultados de rugosidad en probetas de desbaste a 2 mm

Resultados de desbaste a 2 mm		
fz (mm/diente)	Vc (m/min)	Ra ( $\mu$ m)
0.1	62.5	1.197
0.2	100	2.706
0.3	62.5	6.611
0.4	87.5	3.685

Nota: Se muestra los datos seleccionados en cada gama de probetas realizadas a un fz diferente.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Gráfica de rugosidad en función de fz y Vc - resultado de desbaste a 2 mm

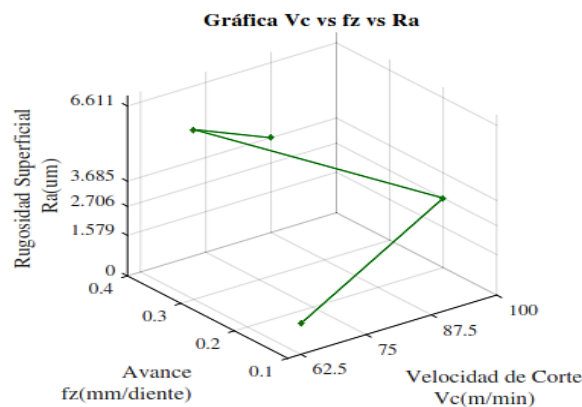


Figura 35. Gráfica tridimensional de desbaste a 2 mm de profundidad

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)



### Gráfica de resultados de desbaste a 2 mm en planos bidimensionales

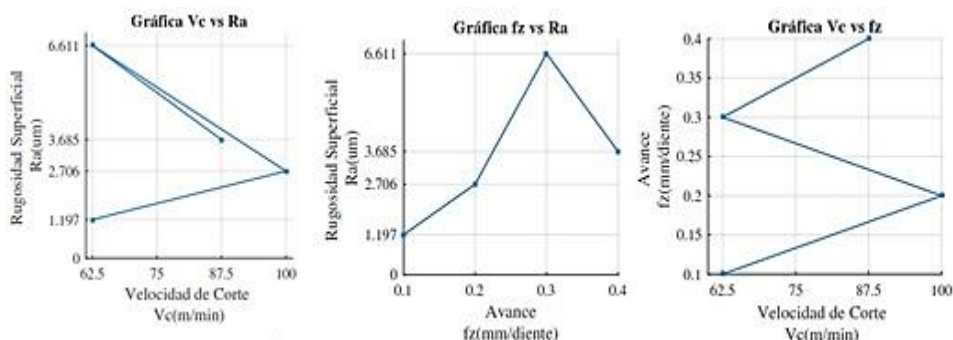


Figura 36. Vistas laterales del comportamiento de las curvas

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

De acuerdo a los resultados mostrados en la figura 35 y 36, los parámetros más idóneos a ser seleccionados dependen principalmente del valor mínimo de rugosidad media (Ra), los cuales pertenecen a la probeta N° 1, con fz de 0.1, del ensayo N° 1 con las siguientes características mostradas en la tabla 33.

Tabla 33.

Parámetros de mecanizado de desbaste (2 mm) aluminio Produx

Profundidad de corte (mm)		2	
f z (mm / diente)		0.1	
Parámetros de mecanizado		Resultados de rugosidad (μm)	
<b>Vc</b> (m/min)	62.5	<b>Ra</b>	1.197
<b>RPM</b>	994.7	<b>Rq</b>	1.539
<b>Av</b> (mm/vuelta)	0.4		
<b>Am</b> (mm/min)	397.9	<b>Rz</b>	9.569

Nota: Selección de rugosidad media mínima para el excelente mecanizado en una profundidad de 2 mm.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Se puede concluir que al mecanizar con una velocidad de corte y un avance por diente de la herramienta mínimo, el desprendimiento del material se produce de

manera uniforme permitiendo que la fresa mantenga sus filos de corte en buenas condiciones durante el proceso de mecanizado, cabe mencionar que el caudal de refrigeración utilizado es de 10 l/min, el mismo que se mantiene en constante circulación con el fin de limpiar la superficie y disipar el aumento de temperatura generada en el ambiente de contacto.

### 3.2 Análisis de desbaste con profundidad de 4 mm

En la tabla 34 se observa los valores mínimos registrados por el rugosímetro.

Tabla 34.

Resultados de rugosidad en probetas de desbaste a 4 mm

Resultados de desbaste a 4 mm		
fz (mm/diente)	Vc (m/min)	Ra ( $\mu\text{m}$ )
0.1	62.5	3.521
0.2	75	3.252
0.3	100	3.067
0.4	62.5	1.579

Nota: Selección de cada subconjunto de valores en fz con la rugosidad media mínima.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Gráfica de rugosidad en función de fz y Vc - resultado de desbaste a 4 mm

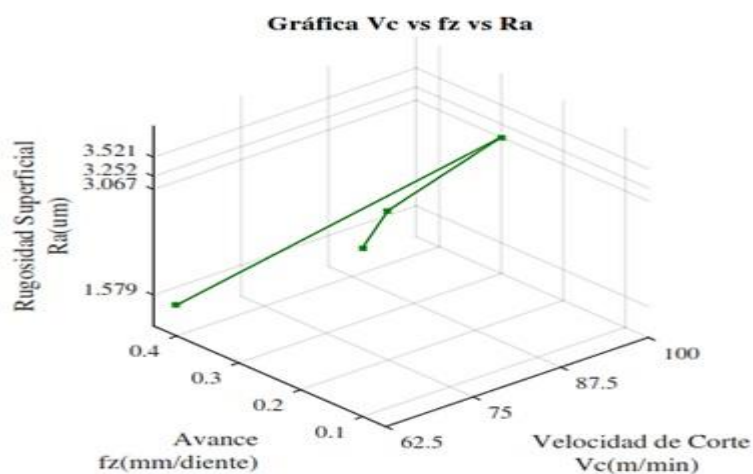


Figura 37. Gráfica tridimensional de desbaste a 4 mm de profundidad

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Gráfica de resultados de desbaste a 4 mm en planos bidimensionales

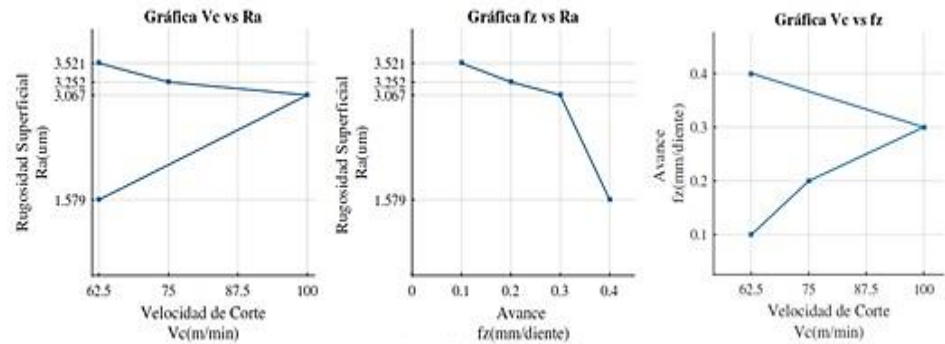


Figura 38. Vistas laterales del comportamiento de las curvas

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

De acuerdo a los resultados mostrados en la figura 37 y 38, los parámetros más idóneos a ser seleccionados en este tipo de desbaste dependen principalmente del valor mínimo de rugosidad media (Ra), los cuales pertenecen a la probeta N° 1 con fz de 0.4, del ensayo N° 2 con las siguientes características mostradas en la tabla 35.

Tabla 35.

Parámetros de mecanizado de desbaste (4 mm) aluminio Produx

Profundidad de corte (mm)		4	
f z (mm / diente)		0.4	
Parámetros de mecanizado		Resultados de rugosidad ( $\mu\text{m}$ )	
Vc (m/min)	62.5	Ra	1.579
RPM	994.7	Rq	1.959
Av (mm/vuelta)	1.6		
Am (mm/min)	1591.6	Rz	7.459

Nota: Selección de rugosidad media mínima para el excelente mecanizado en una profundidad de 4 mm.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

En este caso la profundidad de corte influye notoriamente respecto al resultado superficial, cambiando el valor de avance por diente de la herramienta respecto al



desbaste de 2 mm, por lo que el mecanizado corresponde a una mínima velocidad de corte y un avance máximo, de igual manera la circulación del refrigerante se mantiene constante.

### 3.3 Análisis de acabado con profundidad de 1 mm

En la tabla 36 se observa los valores mínimos registrados por el rugosímetro.

Tabla 36.

Resultados de rugosidad en probetas de acabado a 1 mm

<b>Resultados de acabado a 1 mm</b>		
<b>fz (mm/diente)</b>	<b>Vc (m/min)</b>	<b>Ra (<math>\mu</math>m)</b>
0,05	50	0,401
0,2	30	1,246
0,35	30	1,668

Nota: Se muestra la variación de los valores de fz a través de la selección de su rugosidad media mínima en cada conjunto de probetas con profundidad de corte de 1mm.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Gráfica de rugosidad en función de fz y Vc - resultado de acabado a 1 mm

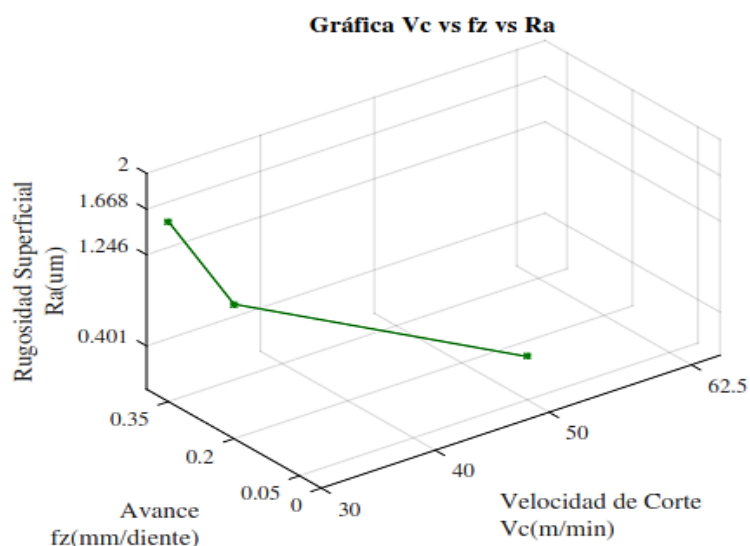


Figura 39. Gráfica tridimensional de acabado a 1 mm de profundidad

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Gráfica de resultados de desbaste a 1 mm en planos bidimensionales

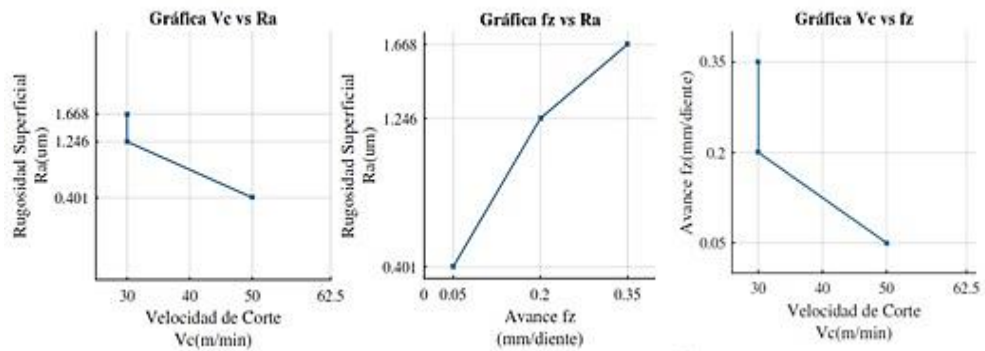


Figura 40. Vistas laterales del comportamiento de las curvas

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

En la figura 39 y 40, se identifican los valores más útiles para el acabado, los cuales marcan el mínimo de rugosidad media que se enfocan en la probeta N° 3 con fz de 0.05 correspondiente al ensayo N° 3 cuyas tipologías se muestran en la tabla 37.

Tabla 37.

Parámetros de mecanizado de acabado (1 mm) aluminio Produx

Profundidad de corte (mm)		1	
f z (mm / diente)		0.05	
Parámetros de mecanizado		Resultados de rugosidad (μm)	
<b>Vc</b> (m/min)	50	<b>Ra</b>	0.401
<b>RPM</b>	795.8	<b>Rq</b>	0.494
<b>Av</b> (mm/vuelta)	0.2		
<b>Am</b> (mm/min)	159.2	<b>Rz</b>	2.262

Nota: se indica los parámetros óptimos de mecanizado para la rugosidad mínima del conjunto de valores de fz antes mencionados a una profundidad de corte de 1mm.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Tomando en cuenta que los parámetros como profundidad y emisión de líquido refrigerante es constante se debe considerar que los factores bien establecidos para la estipulación de los valores de la probeta N° 3 en el ensayo N° 3 son los idóneos debido a que el avance es minúsculo a comparación de los ya establecidos por el mecanizado de desbaste así mismo la velocidad de corte está en un rango aproximado al límite superior el cual brinda una alta velocidad con un avance bajo provocando un terminado de baja rugosidad y altamente estético.

### 3.4 Análisis de acabado con profundidad de 0.2 mm.

En la tabla 38 se observa los valores mínimos registrados por el rugosímetro.

Tabla 38.

Resultados de rugosidad en probetas de acabado a 0.2 mm

<b>Resultados de acabado a 0.2 mm</b>		
<b>fz (mm/diente)</b>	<b>Vc (m/min)</b>	<b>Ra (μm)</b>
0,05	62,5	0,528
0,2	40	1,146
0,35	50	1,667

Nota: Se muestra la variación de los valores de fz a través de la selección de su rugosidad media mínima en cada conjunto de probetas con profundidad de corte de 0.2 mm.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Gráfica de rugosidad en función  $f_z$  y  $V_c$ - resultado de acabado a 0.2 mm

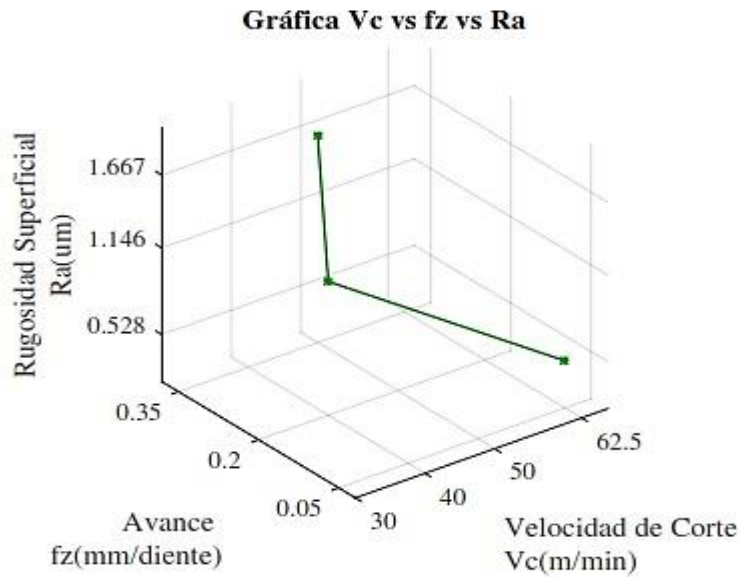


Figura 41. Gráfica tridimensional de acabado a 0.2 mm de profundidad

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Gráfica de resultado de acabado a 0.2 mm en planos bidimensionales

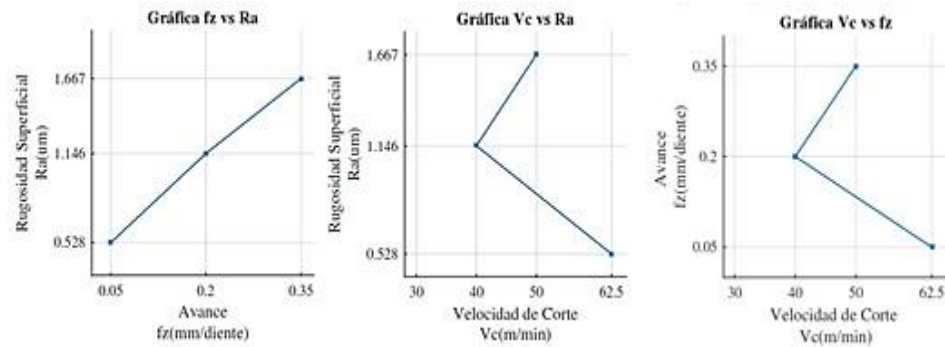


Figura 42. Vistas laterales del comportamiento de las curvas

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Como opción más idónea encontrada en la tabla 41 y 42 se determina que la probeta N° 4 en el ensayo N° 4 con una rugosidad media de 0.528  $\mu\text{m}$  con  $f_z$  de 0.05, siendo esta la que se diferenciaría de las demás por su baja Ra y a la vez por su alto rango de velocidad de corte y sus demás valores preestablecidos en la tabla 39.

Tabla 39.

Parámetros de mecanizado de acabado (0.2 mm) aluminio Prodax

Profundidad de corte (mm)		0.2	
f z (mm / diente)		0.05	
<b>Parámetros de mecanizado</b>		<b>Resultados de rugosidad (μm)</b>	
<b>Vc</b> (m/min)	62.5	<b>Ra</b>	0.528
<b>RPM</b>	994.7	<b>Rq</b>	0.644
<b>Av</b> (mm/vuelta)	0.2		
<b>Am</b> (mm/min)	198.9	<b>Rz</b>	2.913

Nota: se indica los parámetros óptimos de mecanizado para la rugosidad mínima del conjunto de valores de fz antes mencionados a una profundidad de corte de 0.2 mm.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Al determinar los mejores parámetros para el mecanizado de acabado en profundidad de 0.2 mm podemos concluir que al igual que en la Tabla 38 el fz es de 0.05 mm/diente y la velocidad es el límite superior del rango establecido por el proveedor 62.5 m/min y con su respectivo avance de 0.2 mm/vuelta se denotara que mientras más elevada sea la velocidad de corte y un avance mínimo el desprendimiento será perfeccionado por diminuta distancia que hay entre paso de la hélice de corte.

### 3.5 Comparación de resultados en el mecanizado

Los valores del proceso de desbaste y acabado seleccionados anteriormente se los muestra a continuación en la figura 43 y 44 respectivamente.

### Comparación de resultados en el procesos de desbaste

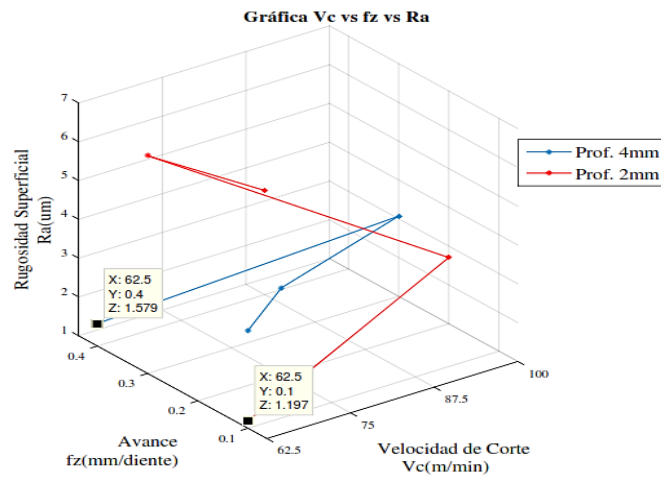


Figura 43. Curvas de resultados entre 4 y 2 mm de profundidad en el proceso de desbaste

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

### Comparación de resultados en el procesos de acabado

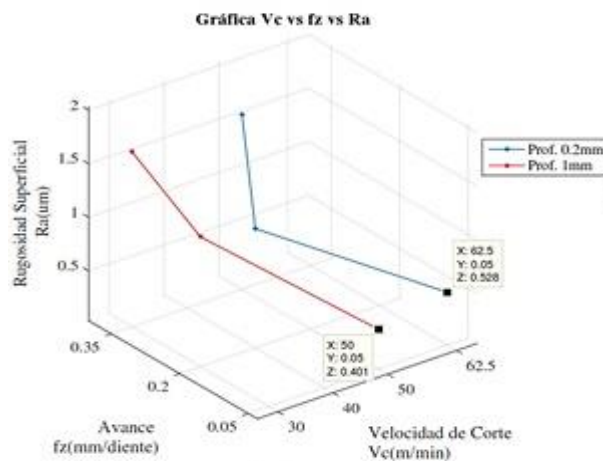


Figura 44. Curvas de resultados entre 0.2 y 1 mm de profundidad en el proceso de acabado

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

## 3.6 Resultado general del análisis

Los valores descritos a continuación en la tabla 41 se definen como parámetros óptimos del fresado plano al presentar las mejores características superficiales en el

proceso de desbaste y de acabado, que a su vez se verificaron sobre una nueva probeta base, donde se obtuvo una mínima variación en centésimas de micra como lo muestra la tabla 40. La verificación da como resultado los siguientes datos:

Tabla 40.  
Verificación de resultados

Probetas verificadas			
Operación	Profundidad	Datos de ensayos Ra	Comprobación Ra
Acabado	0.2 mm	0.528 $\mu$ m	0.536 $\mu$ m
	1 mm	0.401 $\mu$ m	0.394 $\mu$ m
Desbaste	2 mm	1.197 $\mu$ m	1.195 $\mu$ m
	4 mm	1.579 $\mu$ m	1.587 $\mu$ m

Nota: La comprobación de los datos seleccionados en desbaste y acabado son verificados con a través de la realización de nuevos ensayos donde se obtiene una diferencia mínima de centésimas de  $\mu$ m.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

Tabla 41.

Parámetros óptimos de mecanizado ASSAB PRODAX AA-7075

PARÁMETROS ÓPTIMOS DE MECANIZADO ASSAB PRODAX AA-7075						
Operación de fresado	Desbastado					
Fresado Frontal	Velocidad de corte (m/min)	Avance (mm / diente)	Avance mm/min	Velocidad de corte (m/min)	Avance (mm / diente)	Avance mm/min
	Profundidad de pasada $\approx$ 2 mm			Profundidad de pasada $\approx$ 4 mm		
	62.5	0.1	397.9	62.5	0.4	1591.6
	Acabado					
Fresado Frontal	Velocidad de corte (m/min)	Avance (mm / diente)	Avance mm/min	Velocidad de corte (m/min)	Avance (mm / diente)	Avance mm/min
	Profundidad de pasada $\approx$ 1 mm			Profundidad de pasada $\approx$ 0.2 mm		
	50	0.05	159.2	62.5	0.05	198.9

Nota: Este listado enuncia los parámetros de corte y mecanizado para una obtención de calidades superficiales óptimas en el fresado frontal de desbaste y acabado.

Elaborado por: C. Aguirre, M. Cuñas., (2016)

La medición del rugosímetro y la visualización microscópica son factores importantes en el momento de justificar estos valores, al tratarse de haber hecho una serie de ensayos y escogido los más óptimos en cada etapa, con este fin se procede a recomendar estos datos bajo las respectivas condiciones de uso, las cuales son: una herramienta de corte de acero rápido de diámetro 20 mm (fresa HSS) con 4 filos cortantes manteniendo una constante circulación de 10 l /min de refrigerante en el centro de mecanizado Leadwell V20i, con el fin de mantener una temperatura estable en el ambiente de corte evitando sobrecalentamientos y a la vez el desgaste en la herramienta.

### **3.7 Discusión de resultados.**

Al considerar los datos finales descritos en la tabla 41 del aluminio PRODAX o aluminio AA7075-T6 con referencia a lo expuesto por el fabricante, se puede indicar que las características para un excelente mecanizado en tiempos reducidos y con un menor desgaste herramental se están cumpliendo en la mayoría de probetas, en los datos del productor de este material encontramos que los rangos a los cuales se recomienda al usuario trabajar vienen estipulados en la tabla 12 donde se muestran que para una herramienta de acero rápido la velocidad de corte ( $V_c$ ), avance ( $f_z$ ) y profundidad de corte, pueden ser mejorados con la elección correcta de parámetros que se describieron en la tabla 41.

Además se puede observar que los datos del fresado Fontal para desbaste a 2 mm en la tabla 41 se encuentran como límite inferior de los rangos establecidos para el mecanizado plano, este da a relucir que la velocidad de corte en m/min y los avances tanto de mm/diente y mm/min deben ser reducidos para lograr una mínima rugosidad y un excelente detalle superficial.



Del mismo modo al analizar los mismos factores a una profundidad de 4 mm se determina que el rango de velocidad de corte y las RPM se mantendrían de forma similar a la profundidad de 2 mm, por otro lado existe un cambio drástico en los avances en mm/diente y mm/min, como análisis final se determina que los factores que se mantendrían constantes serían la  $V_c$  y las RPM mas no el  $f_z$  obteniendo una diferencia de 4 veces la cantidad del límite mínimo establecido por el proveedor.

En el análisis de acabado podemos encontrar una similitud en los valores inferiores del avance  $f_z$  para el mecanizado en 1 y 0.2 mm los mismos que demuestran ser óptimos para la ejecución de trabajos sobre el Produx, adicionalmente la diferencia se encuentra en los siguientes factores,  $V_c$ , RPM y  $A_m$  al estar ligados unos con otros.

### **3.8 Discusión de resultados en tiempos de mecanizado.**

El tiempo de mecanizado en el fresado frontal se considera desde el momento en que hay desprendimiento del material por lo se toma en cuenta la entrada y salida que realiza la herramienta de corte conjuntamente con la longitud que se desplaza en la pieza, esta longitud total sobre el avance de la mesa, al haber realizado la operación del planeado la entrada que realiza la fresa es igual al radio de la misma, la longitud de la pieza corresponde al diseño de la probeta y la salida igualmente será el radio de la fresa.

Al enfocarse en los resultados de rugosidad y calidades obtenidas en las probetas, los cálculos y valores del tiempo se desarrollaron directamente en el centro de mecanizado, consiguiendo tiempos fuera de la producción como es el de posicionamiento, retirada y puesta de la pieza entre otros, y los tiempos de corte o de producción que dependen del avance, velocidad de corte y profundidad.

La longitud a considerar se mantiene constante en todas las probetas (100mm), los resultados obtenidos no mantienen demasiada diferencia en los procesos de desbaste como también en los de acabado, debido a que no se desarrolla un trabajo en grandes dimensiones donde se apreciaría con mayor exactitud la variación y se optaría por considerar los procesos de optimización.

La variación de tiempo presentada en el desbaste para 2 y 4 mm tiene un margen de diferencia de 10 segundos para todos los ensayos, mientras que en los valores de la tabla 41 el margen disminuye a 8.5 segundos. De igual manera para el proceso de acabado a 1 y 0.2 mm la diferencia es de 35 segundos en todos pero al enfocarse en los resultados óptimos la variación que se genera es de 4.2 segundos.

Consiguiendo así inoportuno profundizar sobre la optimización de tiempos en el análisis de rugosidades.

## Conclusiones

En la presente investigación se logró conocer más a fondo las características primordiales del Prodax y sus aplicaciones industriales dentro del conformado en moldes y el sector aeronáutico, además de llegar a adquirir conocimientos teóricos y prácticos en el manejo del software inventor CAM demo para la programación adecuada del mecanizado en las probetas.

El mecanizado para analizar las calidades de las superficies planas se lo realizó mediante la utilización de una fresadora CNC la cual fue asistida por un sistema CAD-CAM mediante la variación de parámetros, donde se demostró que los rangos que indica el fabricante respecto a  $V_c$  de 62.5 a 100 m/min,  $f_z$  de 0.1 a 0.4 mm/diente en desbaste y  $V_c$  de 30 a 62.5 m/min,  $f_z$  de 0.05 a 0.35 mm/diente en acabado son muy amplios y no delimita un valor específico para el perfecto mecanizado a distintas profundidades.

En la comparación de resultados se determinó que para el proceso de desbaste plano los valores óptimos se encuentran a una  $V_c$  de 62.5 m/min en profundidades de 4 mm y 2 mm, en este caso, la diferencia se encuentra en los avances de 0.4 a 0.1 mm/diente respectivamente, del mismo modo para el proceso de acabado las  $V_c$  presentan una ligera variación de 62.5 m/min y 50 m/min para profundidades de 0.2 mm y 1 mm manteniendo un avance de 0.05 mm/ diente.

En la realización de las probetas se demostró que los diferentes acabados superficiales recaen en su mayoría en la ejecución de una óptima programación, preparación de cálculos adecuados y selección de herramientas en perfecto estado, esto ayuda en la obtención de resultados totalmente viables y concisos con el fin de ser representados de la tabla final de datos recomendables para el operador.

En el cotejo de rugosidades se ha identificado que los cambios de parámetros antes mencionados son los que definen si existen ranuras pronunciadas por el desprendimiento de material, del mismo modo la creación de fisuras en la superficie, siendo estos evitados con la correcta elección de los parámetros de mecanizado.

Para la evaluación de resultados se ha enfocado en el avance  $A_m$  (mm/min) respecto a  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ) rugosidad superficial media, donde se aprecia que la calidad superficial obtenida en una profundidad de 4 mm da como resultado  $R_a$  1.579  $\mu\text{m}$  y  $A_m$  de 1591.6 mm/min, de igual manera para 2 mm el valor  $R_a$  1.197  $\mu\text{m}$  y  $A_m$  de 397.9 mm/min el cual destaca que el porcentaje de mejora entre los dos límites de profundidad de 2 y 4 mm es de 24.19% de uno con respecto al otro siendo el límite de 2 mm más aceptable en el proceso de desbaste, mientras que en el acabado presenta avances minúsculos equivalentes a  $A_m$  de 159.2 mm/min y  $R_a$  0.401  $\mu\text{m}$  para 1 mm, de igual manera  $A_m$  de 198.9 mm/min y  $R_a$  0.528  $\mu\text{m}$  para 0.2 mm, obteniendo un porcentaje de mejora del 24.05% a 1 mm de profundidad, el factor más influyente en la elaboración de buenas calidades es el avance  $A_m$  y la velocidad de corte la misma que mantiene un mínimo entre 50 a 62.5 m/min para la obtención de bajos niveles de rugosidad.

## **Recomendaciones**

Se debe analizar de manera correcta los datos que emiten los fabricantes ya que en esta investigación se pudo deducir que las velocidades de corte fueron simplemente consideradas para una sola hélice de corte, ya que al emitir los valores para la programación en el software InventorCAM Demo desplegaba una serie de errores para la fabricación, siendo el factor de número de filos cortantes el determinante para la selección de datos óptimos para el mecanizado.

Se debe considerar el estado de las herramientas a utilizar como fresa de botón, elementos de sujeción e instrumentos de medición y calibración, cuyo deterioro en la elaboración de probetas puede marcar la obtención errónea de resultados.

Para obtener los valores de rugosidad exactos es importante revisar la calibración del rugosímetro mediante un patrón de medida estandarizado antes de realizar las medidas en las probetas, debido a que el instrumento posee una aguja palpadora muy sensible, además de mantener las superficies limpias, sin grasa o aceite.

Los valores de corte ya establecidos en esta investigación son recomendables para su respectiva utilización en el mecanizado plano, los procesos de producción exigen al mercado nacional una buena calidad superficial, es por eso que se ha destinado trabajar en el Prodax debido a su variada aplicación.

## Referencias

- Albertí, M. (2010). *Contribución al desarrollo del proceso de selección del centro de mecanizado de alta velocidad basado en parámetros tecnológicos y de productividad*. Obtenido de <http://dugi-doc.udg.edu/bitstream/handle/10256/4753/tmai.pdf?sequence=1>
- Añazco, M. V., & Loachamín, O. B. (2006). “*ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE PROCEDIMIENTO DE PROCESOS DE FRESADO CON SOLIDCAM PARA LA MANUFACTURA DE ELEMENTOS MECÁNICOS PARA EL CENTRO DE MECANIZADO LEADWELL V-30 DE AEROTECNOLOGÍA*”. Sangolqui.
- Arbol de tinta SAS. (Febrero- Abril de 2014). *Metal Actual*. (C. Marin Villar , Ed.) Recuperado el 28 de Enero de 2016, de [http://www.metalactual.com/revista/31/materiales\\_aleaciones.pdf](http://www.metalactual.com/revista/31/materiales_aleaciones.pdf)
- Arias, M. E. (2010). *Diseño y manufactura asistida por computador (CAD-CAM) en la construccion de pieza con proceso de torneado de control numerico (CNC)*. Guayaquil.
- Axxecol S.A. (28 de Enero de 2016). *AXXECOL S.A.* Recuperado el 28 de Enero de 2016, de [https://docs.google.com/viewer?url=http%3A%2F%2Faxxecol.com%2F\\_Axxecol%2F\\_DwPortal%2FDocuments%2FProdax%2520Spa.pdf](https://docs.google.com/viewer?url=http%3A%2F%2Faxxecol.com%2F_Axxecol%2F_DwPortal%2FDocuments%2FProdax%2520Spa.pdf)
- Castro, G. (Febrero de 2008). *Mecanizado de alta velocidad*. Recuperado el 18 de 03 de 2016, de [http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material\\_Complementario/Mecanizado\\_de\\_Alta\\_Velocidad.pdf](http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Mecanizado_de_Alta_Velocidad.pdf)

- EngineersHandbook. (2004). *Manufacturing Methods*. Obtenido de <http://engineershandbook.com/MfgMethods/>
- Estrems, M. (2007). *Universidad Politécnica de Cartagena-Principios de mecanizado y planificación de procesos*. Obtenido de [http://www.dimf.upct.es/personal/EA\\_M/Principios%20de%20mecanizado.pdf](http://www.dimf.upct.es/personal/EA_M/Principios%20de%20mecanizado.pdf)
- Fanuc Corporation, F. (2008). [http://www.fanuc.co.jp/en/product/catalog/pdf/cnc/Series%20i-D\(E\)\\_v05a.pdf](http://www.fanuc.co.jp/en/product/catalog/pdf/cnc/Series%20i-D(E)_v05a.pdf).
- Interempresas. (Enero de 2015). *Técnica y Tecnología*. Obtenido de Grandes mecanizados: <http://www.interempresas.net/Flipbooks/XM/26/>
- Johnson, C. G., & Weeks, W. R. (1961). *Metalurgia* (Cuarta ed.). Barcelona: Reverté, S.A.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (4ta ed.). México: Pearson Educación.
- Krar, S. F., Gill, A. R., & Smid, P. (2009). *Tecnología de las Máquinas Herramientas* (Sexta ed.). México: Alfaomega.
- Leadwell. (2011). *Products Cataloge*. 5.
- Millán Gomez, S. (2012). *Metrologia y ensayos* (Primera ed.). Madrid: Paraninfo.
- Neely, J. E. (2002). *Metalurgia y materiales industriales*. (Noriega, Ed.) México: Limusa S.A.

Ramon. (10 de 03 de 2009). *Tecnologia Industrial*. Recuperado el 28 de 01 de 2016, de Tecnologia Industrial: <http://ramon-tecnologiaindustrial.blogspot.com/>

Sivak, M., Martínez, K., & Maceira, G. (2002). *Mecanizado de alta velocidad*.

Obtenido de <http://inti.gob.ar/mecanica/pdf/mav.pdf>

Smith, W. F., & Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (Quinta ed.). México D.F: McGRAW HILL

INTERAMERICANA EDITORES S.A.

SolidCAM Ltd. (2016).

[http://www.inventorcam.com/us/news/news/singleview/?cHash=912114a8c378b32189237b3e3bda587a&tx\\_news\\_pi1%5Baction%5D=detail&tx\\_news\\_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx\\_news\\_pi1%5Bnews%5D=506](http://www.inventorcam.com/us/news/news/singleview/?cHash=912114a8c378b32189237b3e3bda587a&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Bnews%5D=506).

V. Ryan. (2009). *The CNC machine and coordinates*. Recuperado el 18 de 03 de 2016, de <http://www.technologystudent.com/cam/cnccut1.html>

Vega Morón, R. C. (2012). *Estudio de estrategias de corte en el proceso de fresado*.

Universitaria, Mexico D.F: Universidad Nacional Autonoma de Mexico.



## Anexos

### Anexo 1 Códigos “G”

Código G	Grupo	Función
G00	_01	Posicionamiento
G01		Interpolación Lineal
G02		Interpolación Circular (sentido horario)
G03		Interpolación Circular (sentido antihorario)
G04	_00	Paro exacto, temporización
G05.1		Control avanzado
G07.1		Interpolación cilíndrica
G08		Control previo avanzado
G09		Parada exacta
G10		Ingreso programable de datos
G11		Modo de cancelación de ingreso programable de datos
G15	17	Cancelación de coordenadas polares
G16		Activación de coordenadas polares
G17	_02	Selección del plano XY
G18		Selección del plano XZ
G19		Selección del plano YZ
G20	_06	Entrada en pulgadas
G21		Entrada en milímetros
G27	_00	
G28		Retorno a la posición de referencia
G29		Retorno de la posición de referencia
G30		Retorno a la 2a, 3a y 4a posición de referencia
G31		Función de salto
G33	_01	Activación de corte por hilo
G37	_00	Medición automática de longitud de herramienta
G39		Desplazamiento de esquina en interpolación circular
G40	_07	Cancelación de compensaciones de corte
G41		Compensación de corte izquierda
G42		Compensación de corte derecha
G40.1	19	Modo de cancelación de dirección normal de corte
G41.1		Activación control de dirección de corte en el lado izquierdo
G42.1		Activación control de dirección de corte en el lado derecho
G43	_08	Compensación positiva de longitud de herramienta
G44		Compensación negativa de longitud de herramienta
G45	_00	Incremento de offset de herramienta
G46		Decremento de offset de herramienta
G47		Doble incremento de offset de herramienta
G48		Doble decremento de offset de herramienta
G49	_08	Cancelación de compensación de longitud de herramienta
G50	11	Cancelación de escalamiento
G51		Escalamiento
G50.1	22	Cancelación de imagen programada de espejo
G51.1		Imagen programada de espejo
G52	_00	Seteado del sistema local coordinado

G53		Selección del sistema coordinado de máquina
G54	14	Selección de cero de pieza
G54.1		Selección de sistema adicional de cero de pieza
G55		Selección de 2o sistema de cero de pieza
G56		Selección de 3er sistema de cero de pieza
G57		Selección de 4to sistema de cero de pieza
G58		Selección de 5to sistema de cero de pieza
G59		Selección de 6to sistema de cero de pieza
G60	_00	Dirección individual de posicionamiento
G61	15	Modo exacto de paro
G62		Automática sobre medida de esquina
G63		Activación de modo de roscado
G64		Activación de modo de corte
G65	_00	Llamada de macros
G66	12	Llamada de macros modales
G67		Cancelación de macros modales
G68	16	Rotación coordenada
G69		Cancelación de rotación coordenada
G73	_09	Taladrado rompe viruta
G74		Roscado Izquierda
G75	_01	Ciclo de zambullida (no apto para fresadoras)
G76	_09	Alesado o Mandrinado de Precisión
G77	_01	Dirección constante - dimension plunge grinding cycle (for grinding machine)
G78		Continuo - Avance de superficie grinding cycle (for grinding machine)
G79		Intermitente - Avance de superficie grinding cycle (for grinding machine)
G80	_09	Cancelación de ciclos fijos
G81		Taladrado Normal
G82		Taladrado temporizado en el fondo
G83		Taladrado con desahogo total de viruta
G84		Roscado derecha
G85		Escariado o Rimado
G86		Escariado o Rimado
G87		Cancelación de escariado
G88		Escariado o Rimado
G89		Escariado o Rimado
G90	_03	Coordenadas absolutas
G91		Coordenadas relativas
G94	_05	Avance por minuto
G95		Avance por rotación
G96	13	Control de velocidad de constante sobre superficie
G97		Cancelación de control de velocidad de constante sobre superficie
G98	10	Retorno al punto inicial de seguridad
G99		Retorno al punto superior de seguridad

Fuente: (Añazco & Loachamín, 2006, págs. vii-ix)

## Anexo 2 Códigos “M”

<b>Código M</b>	<b>Función</b>
M00	Parada de programa
M01	Parada opcional de programa
M02	Fin de Programa
M03	Encendido de Husillo CW
M04	Encendido de Husillo CCW
M05	Parada de Husillo
M06	Cambio de Herramienta
M07	Activación de refrigerante
M08	Encendido de refrigerante
M09	Apagado de refrigerante
M13	Husillo CW + refrigerante On
M14	Husillo CCW + refrigerante On
M19	Orientación de Husillo
M20	Referenciación de carrusel de herramientas
M21	Giro del Carrusel de Herramienta Derecha
M22	Giro del Carrusel de Herramienta Izquierda
M25	Liberación de cono del husillo
M26	Atrapa cono al husillo
M29	Activa Roscado rígido
M30	Fin de Programa
M40	Activación de 4º eje
M41	Desactivación de 4º eje
M45	Activación de limpiador de viruta
M46	Desactivación de limpiador de viruta
M61	Cancelación de Imagen espejo respecto a eje X
M62	Cancelación de Imagen espejo respecto a eje Y
M64	Cancelación de Imagen espejo respecto a eje Z
M66	Durante cambio de herramienta
M67	Cancela M66
M70	Cancelación total de comandos espejo
M71	Activación de Imagen espejo respecto a eje X
M72	Activación de Imagen espejo respecto a eje Y
M73	Activación de Imagen espejo respecto a eje Z
M74	Activación de Imagen espejo respecto a 4º eje
M98	Llama Sub-Programa
M99	Fin de Sub-Programa

Fuente: (Añazco & Loachamín, 2006, págs. xii-xiv)

Anexo 3 Especificaciones técnicas del Centro de Mecanizado Leadwell v20i.

MODEL V-20i			
A.T.C		DRUM (STD.)	ARM(OPT.)
CAPACITY	UNIT		
X axis travel	mm(in)	510 (20.1)	
Y axis travel	mm(in)	350 (13.8)	
Z axis travel	mm(in)	400+110(15.7+4.3)	510(20.1)
Distance from spindle nose to table surface	mm(in)	132-642(5.2-25.3)	
Distance from spindle nose to column surface	mm(in)	410(16.1)	
TABLE			
Table size (LxW)	mm(in)	600x350(23.6x13.8)	
Max. table load weight	Kg(lb)	220(440)	
T-solt size		18TxP125x3	
SPINDLE			
Spindle speeds	rpm	8000	
Spindle nose (nominal size, No.)		No.40	
Spindle bearing inner diameter	mm	60(2.4)/50(2)	
FEEDRATE			
Rapid traverse X/Y/Z	M/min(IPM)	36/36/20(1417/1417/787)	
Max. cuttung feedrate	M/min(IPM)	10(394)	
A.T.C (Automatic Tool Changer)			
Tool storage capacity (Drum/Arm opt.)	pcs	20	
Max. tool diameter (with adjacent tools)	mm(in)	89(3.5)	80(3.15)
Max. tool length	mm(in)	200(7.9)	
Tool change time (T-T/C-C)	sec	8.5/10	4.1/10
MOTORS			
Spindle motor (30min) FANUC	kW (HP)	11(14.7)	
X/Y/Z axis motor	kW (HP)	1.6/3/3(2.1/4/4)	
MACHINE SIZE			
Height of machine (H)	mm(in)	2504(99.2)	
Floor space (LxW)	mm(in)	1900x2983(68.7x117.4)	
Total machine weight	Kg(lb)	3000(6610)	
Power requirement	KVA	25	
Computer control	FANUC	0i-M	

Fuente: (Leadwell, 2011, pág. 10)

# UHB•Prodax

## ASSAB Prodax



### Aluminio de Alta Resistencia

#### General

*PRODAX* es una aleación de aluminio de alta resistencia, laminado en caliente, que se entrega en placas tratadas térmicamente. Las mismas son sometidas a una operación especial de estiramiento en frío para el máximo alivio de tensiones. Dado su alta resistencia y buena estabilidad, *PRODAX* se ha convertido en un material ampliamente utilizado en la industria de moldes y matrices. Condición de entrega: Tratado térmicamente a 164–168 Brinell.

*PRODAX* posee las siguientes características, que lo hacen apropiado para distintos tipos de herramientas, especialmente moldes para plásticos:

- **Excelente mecanizado**

Altas velocidades de corte, tiempos de mecanizado reducidos, menos costo de herramental, entregas más rápidas.

- **Bajo Peso**

Su bajo peso (aproximadamente la tercera parte del peso del acero), hace el manejo del herramental más fácil y sencillo. Su baja inercia hace posible acelerar el tiempo de cierre y apertura de los moldes.

- **Alta Conductividad térmica**

Se reduce el tiempo de los ciclos y se pueden utilizar sistemas de enfriamiento menos complicados.

- **Buena estabilidad**

La operación especial de alivio de tensiones garantiza una deformación mínima durante y luego del mecanizado.

- **Buena resistencia a la corrosión**

Buena resistencia contra todos los plásticos utilizados habitualmente.

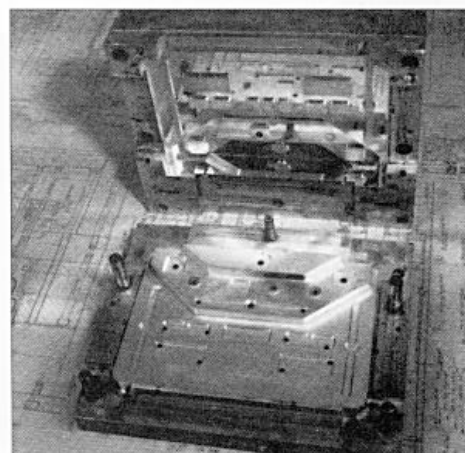
- **Apropiado para tratamientos superficiales**

*PRODAX* es adecuado para realizar anodizado duro, cromado duro o niquelado, para incrementar su dureza, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión.

#### Areas de aplicación

Las propiedades y características que ofrece *PRODAX* lo hacen un material ideal para prototipos y para el moldeo de series cortas o medianas que estén expuestas a presiones altas o plásticos abrasivos. La considerable reducción en los tiempos de preparación de un molde, el menor costo de herramental y los ciclos más cortos, significan valiosos ahorros tanto para el fabricante del molde, como para el usuario final, cuando se utiliza *PRODAX*.

Categoría del herramental	Prototipos	Series Cortas	Series Medianas	Series Largas
Moldes de soplado	X	X	X	X
Formado al Vacío	X	X	X	X
Moldeado de espuma	X	X	X	(X)
Moldes	X	X	X	(X)
Moldes de inyección de termoplásticos	X	X	(X)	
Moldeo de goma	X	X		
Placas contenedoras y de apoyo, guías y sujetadores				



## Propiedades Físicas

Valores a temperatura ambiente, salvo donde se indique específicamente lo contrario.		
Densidad	kg/m <sup>3</sup> lbs/pulg <sup>3</sup>	2.830 0,102
Módulo de elasticidad	N/mm <sup>2</sup> p s i	71.500 10,3 x 10 <sup>6</sup>
Coefficiente de expansión térmica, por °C, de 20°C a 100°C por °F (68-212°F)		23 x 10 <sup>-6</sup> 12,8 x 10 <sup>-6</sup>
Conductividad térmica	W/m°C Btu pulg/pie²h °F	165 1.144
Calor específico	J/kg °C Btu/lb °F	890 0,20

## Propiedades Mecánicas

### Resistencia a la tracción

Los valores de resistencia a la tracción, los que por motivos prácticos se pueden comparar con los valores de resistencia a la compresión, deben tomarse como típicos.

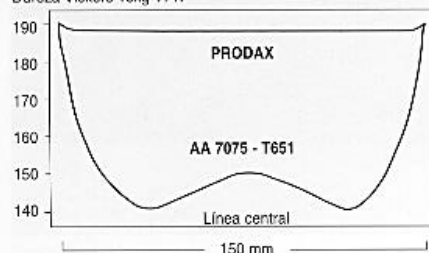
Valores a temperatura ambiente para distintos espesores de placa.

Placas (espesor) mm	Resistencia a la tracción N/mm <sup>2</sup>	Límite de fluencia N/mm <sup>2</sup>
>10-50	590	550
>50-100	570	520
>100-150	550	500
>150-200	535	485
>200-300	430	365
Barras redondas (diámetro) mm		
40	680	630
100	680	620
200	670	610

Debe hacerse notar que las placas han sido testeadas transversalmente, mientras que las barras redondas lo han sido en forma longitudinal.

## Distribución de dureza en sección transversal de placa

Dureza Vickers 10kg VFN



## Mecanizado

Los datos de corte indicados a continuación deben considerarse como valores de guía, y deberán ser adaptados a las condiciones locales existentes.

### Torneado

	Torneado grueso con metal duro	Torneado fino con metal duro	Torneado fino con PCD <sup>1)</sup>	Torneado con acero rápido
Velocidad de corte (v <sub>c</sub> ) m/min a.p.m.	600-1200 1980-3960	1200-2500 3960-8250	600-1500 1980-4950	250-300 825-990
Avance (a) mm/r i.p.r.	0,3-1,0 0,012-0,04	-0,3 -0,012	-0,3 -0,012	-0,3 -0,012
Profundidad de corte (a <sub>p</sub> ) mm pulgadas	2-6 0,08-0,24	-2 -0,08	-3 -0,12	-3 -0,12
Designación del metal duro ISO	K20	K10	-	-

<sup>1)</sup> Diamante policristalino

### Fresado

Fresado frontal y de escuadrado				
	Fresado grueso con metal duro	Fresado fino con metal duro	Fresado fino con PCD <sup>1)</sup>	Fresado con acero rápido
Velocidad de corte (v <sub>c</sub> ) m/min a.p.m.	600-1000 1980-3300	1000-3000 3300-9900	800-4000 2650-13200	250-400 825-1320
Avance (f <sub>a</sub> ) mm/diente pulg./diente	0,2-0,6 0,008-0,024	0,1-0,2 0,004-0,008	0,05-0,2 0,002-0,008	-0,4 -0,016
Profundidad de corte (a <sub>p</sub> ) mm pulgadas	2-8 0,08-0,32	-2 -0,08	-2 -0,08	-8 -0,32
Designación del metal duro ISO	K20	K10	-	-

<sup>1)</sup> Diamante policristalino

Fresado de acabado			
	Placa sólida de metal duro	Inserto indexable de metal duro	Acero rápido
Velocidad de corte (v <sub>c</sub> ) m/min a.p.m.	300-500 990-1650	300-500 990-1650	120-250 400-825
Avance (f <sub>a</sub> ) mm/diente pulg./diente	0,03-0,20 <sup>1)</sup> 0,001-0,008 <sup>1)</sup>	0,08-0,20 <sup>1)</sup> 0,003-0,008 <sup>1)</sup>	0,05-0,35 <sup>1)</sup> 0,002-0,014 <sup>1)</sup>
Designación del metal duro ISO	K20	K20	-

<sup>1)</sup> Dependiendo de la profundidad de corte radial y del diámetro del corte.

Fuente: (Axxecol S.A., 2016)

## Anexo 5 Códigos de programación

```
O5000 (PROBETA1-1.TAP)
( MCV-OP ) (09-APR-2016)
(SUBROUTINES: O2 .. O0)
G90 G17
G80 G49 G40
G55
G91 G28 Z0
G90
M01
N1 M6 T1
(TOOL -1- MILL DIA 20.0 R0. MM )
G90 G00 G40 G55
G43 H1 D31 G0 X60. Y-61.5 Z120. S3979 M3
M8
(-----)
(FM-FACEMILL - FACE-MILLING)
(-----)
  X60. Y-61.5 Z25.
  Z2.
G1 Z-1. F131.303
  Y61.5 F3183.099
G0 Z25.
G91 G28 Z0
G90
M01
N2 M6 T1
(TOOL -2- MILL DIA 20.0 R0. MM )
G90 G00 G40 G55
G43 H2 D32 G0 X40. Y-61.5 Z120. S4218 M3
M8
(-----)
(FM-FACEMILL1 - FACE-MILLING)
(-----)
  X40. Y-61.5 Z25.
  Z2.
G1 Z-1. F139.181
  Y61.5 F3374.085
G0 Z25.
G91 G28 Z0
G90
M01
N3 M6 T1
(TOOL -3- MILL DIA 20.0 R0. MM )
G90 G00 G40 G55
G43 H3 D33 G0 X20. Y-61.5 Z120. S4695 M3
M8
(-----)
(FM-FACEMILL2 - FACE-MILLING)
(-----)
```

```

X20. Y-61.5 Z25.
Z2.
G1 Z-1. F309.875
Y61.5 F3756.057
G0 Z25.
G91 G28 Z0
G90
M01
N4 M6 T1
(TOOL -4- MILL DIA 20.0 R0. MM )
G90 G00 G40 G55
G43 H4 D34 G0 X0. Y-61.5 Z120. S4695 M3
M8
(-----)
(FM-FACEMILL3 - FACE-MILLING)
(-----)
X0. Y-61.5 Z25.
Z2.
G1 Z-1. F309.875
Y61.5 F3756.057
G0 Z25.
G91 G28 Z0
G90
M01
N5 M6 T1
(TOOL -5- MILL DIA 20.0 R0. MM )
G90 G00 G40 G55
G43 H5 D35 G0 X-20. Y-61.5 Z120. S4934 M3
M8
(-----)
(FM-FACEMILL4 - FACE-MILLING)
(-----)
X-20. Y-61.5 Z25.
Z2.
G1 Z-1. F325.631
Y61.5 F3947.043
G0 Z25.
G91 G28 Z0
G90
M01
N6 M6 T1
(TOOL -6- MILL DIA 20.0 R0. MM )
G90 G00 G40 G55
G43 H6 D36 G0 X-40. Y-61.5 Z120. S5173 M3
M8
(-----)
(FM-FACEMILL5 - FACE-MILLING)
(-----)
X-40. Y-61.5 Z25.
Z2.

```



G1 Z-1. F170.694  
     Y61.5 F4138.029  
 G0 Z25.  
 G91 G28 Z0  
 G90  
 M01  
 N7 M6 T1  
 (TOOL -7- MILL DIA 20.0 R0. MM )  
 G90 G00 G40 G55  
 G43 H7 D37 G0 X-60. Y-61.5 Z120. S5411 M3  
 M8  
 (-----)  
 (FM-FACEMILL6 - FACE-MILLING)  
 (-----)  
     X-60. Y-61.5 Z25.  
     Z2.  
 G1 Z-1. F357.144  
     Y61.5 F4329.015  
 G0 Z25.  
 M30